

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace

### The Influence of the Material Model on the Numerical Simulation Accuracy

Bc. Jiří Žďárský

**KSP - TP -**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 108

Počet tabulek: 14

Počet obrázků: 126

Počet příloh: 2

Počet jiných příloh: 1 CD

**Datum:** 25.5.2012



## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Bc. Jiří Ž Ď Á R S K Ý</b>
Studijní program	<b>M2301 Strojní inženýrství</b>
Obor	<b>2303T002 Strojírenská technologie</b>
Zaměření	<b>Tváření kovů a plastů</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Slitiny hliníku používané v konstrukci automobilu.
2. Optické systémy pro analýzu deformace.
3. Zjištění vlivu matematického modelu na přesnost výpočtu procesu tažení výlisku v prostředí PAM STAMP 2G.
4. Experimentální zjištění deformace výlisku.
5. Vyhodnocení prováděných experimentů a dat získaných numerickou simulací.
6. Závěr

# ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 - Strojní inženýrství  
Student: Bc. Jiří Žďárský  
Téma práce: Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace  
The Influence of the Material Model on the Numerical Simulation Accuracy  
Číslo DP: KSP - TP -  
Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*  
Konzultant DP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

## **Abstrakt:**

Úkolem diplomové práce je zjistit vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace v programu PAM-STAMP 2G, porovnat oba výpočtové modely (model dle Hilla 48 a model dle Vegtera) mezi sebou a srovnat je s reálným experimentem. Teoretická část diplomové práce vysvětluje teorii, která se týká trendů ve snižování hmotnosti osobních automobilů, hliníku a jeho slitin, tvařitelností při plošném tváření (zejména základní a technologické zkoušky). Teorie dále pojednává o základech fotogrammetrie ve strojírenství, membránové analogii a o numerických simulacích. V experimentální části diplomové práce je popsán průběh, vyhodnocení měřených zkoušek i numerické simulace lisovacího procesu.

## **Abstract:**

The aim of this thesis is to determinate the influence of the material model on the numerical simulation accuracy at PAM-STAMP 2G, to compare both material models (the Hill 48 material model and the Vegter material model) and to confront them with the real experiment. Theoretical part of this thesis explains the theory that involves a cars weight reducing, aluminium and its alloys, sheet metal formability (mainly basic and technological testing methods). The theory also introduces principles of photogrammetry using in a mechanical engineering, the membrane analogy and numerical simulations. In experimental part of this thesis is described the process, evaluation of both carried out testing methods and evaluation of a forming process numerical simulations.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....  
Bc. Jiří Žďárský

Hoříčky 109

552 05 Hoříčky

### **Poděkování:**

Chtěl bych touto cestou poděkovat Ing. Pavlu SOLFRONKOVI, Ph.D., Ing. Pavlu DOUBKOVI, Ph.D., Ing. Jiřímu SOBOTKOVI, Ph.D., Ing. Michaela KOLNEROVÉ, Ph.D. a ostatním pracovníkům katedry za odbornou pomoc, konzultace a za poskytnutí cenných informací, které mi pomohly při zpracování mé diplomové práce.

Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Milanu DVOŘÁKOVI z firmy Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi, který mi velmi pomohl se snímáním vylišovaných kalíšků pomocí optického systému Argus a poskytl mi informace o tomto měřicím systému. Další poděkování patří Ing. Janu NOVÉMU ze společnosti MECAS ESI s.r.o. v Plzni, který mi poskytl pomoc s numerickou simulací s uplatněným modelem dle Vegtera.

V neposlední řadě patří největší poděkování mým rodičům, kteří mě podporovali během mého studia na Technické univerzitě v Liberci.

## OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
<b>1. ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2. TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>14</b>
2.1 Trendy ve snižování hmotnosti osobních automobilů	14
2.1.1 Nižší hmotnost osobního automobilu a její výhodné vlivy	15
2.1.1.1 Vliv na dynamické schopnosti automobilu	15
2.1.1.2 Vliv na hospodárnost automobilu	15
2.1.1.3 Vliv na jízdní vlastnosti	16
2.1.2 Využití hliníku a jeho slitin v automobilovém průmyslu	16
2.1.3 Konstrukce karoserií	17
2.1.3.1 Audi Space Frame (ASF)	17
2.1.4 Konstrukce hnacího ústrojí	18
2.1.4.1 Blok motoru	19
2.1.4.2 Litá kola	19
2.1.4.3 Chladič	20
2.1.4.4 Písty	20
2.2 Hliník a slitiny hliníku	20
2.2.1 Čistý hliník	21
2.2.2 Slitiny hliníku	22
2.2.2.1 Skupina Al-Mg	23
2.3 Tvařitelnost při plošném tváření	24
2.3.1 Základní zkoušky	24
2.3.1.1 Statická zkouška tahem	24
2.3.1.2 Anizotropie	31
2.3.2 Technologické zkoušky	33
2.3.2.1 Hydraulická zkouška vyboulaváním	33
2.3.2.2 Zkouška hloubením podle Erichsena	34
2.3.2.3 Zkouška kalíšková podle Swifta	35
2.3.2.4 Zkouška tažením v kuželové tažnici	36
2.3.2.5 Zkouška zvlnění	38
2.3.2.6 Zkouška vyboulení	38
2.3.2.7 Zkouška kombinovaná dle Gross-Engelhardta	39
2.3.2.8 Zkouška rozšiřováním otvoru dle Siebel-Pompa	40
2.4 Úvod do membránové analogie	41

2.4.1	Napjatost rotačně symetrické membrány	41
2.5	Fotogrammetrie	43
2.5.1	Rozdělení fotogrammetrie	43
2.5.2	Fotogrammetrie ve strojírenství	45
2.5.2.1	Systém ARAMIS	46
2.5.2.2	Systém PONTOS	49
2.5.2.3	Systém ARGUS	51
2.6	Numerická simulace procesu tváření	53
2.6.1	PAM-STAMP 2G	54
2.6.2	Model VEGTER	54
2.6.2.1	Základní varianta modelu Vegter	55
2.6.2.2	Odlehčená varianta modelu Vegter (Vegter Lite)	56
<b>3.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>58</b>
3.1	Úvod do experimentální části	58
3.2	Statická zkouška tahem	60
3.2.1	Příprava zkušebních vzorků	60
3.2.2	Statická zkouška tahem (měření základních veličin a zjištění aproximačních konstant)	61
3.2.2.1	Vyhodnocení zkoušky	62
3.2.3	Statická zkouška tahem (měření koeficientu normálové anizotropie)	64
3.2.3.1	Vyhodnocení zkoušky	65
3.3	Hydraulická zkouška vyboulováním (BULGE TEST)	66
3.3.1	Příprava zkušebních vzorků	66
3.3.2	Proces měření	67
3.3.3	Vyhodnocení zkoušky	69
3.4	Kalíšková zkouška	74
3.4.1	Příprava zkušebních vzorků	74
3.4.2	Proces měření	76
3.4.3	Vyhodnocení kalíškové zkoušky	77
3.5	Numerická simulace pomocí programu PAM-STAMP 2G	83
3.5.1	Přípravná fáze	83
3.5.2	Model HILL 48	84
3.5.2.1	Vyhodnocení numerické simulace (model HILL 48)	84
3.5.3	Model VEGTER	91
3.5.3.1	Vyhodnocení numerické simulace (model VEGTER)	92

<b>4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b>	<b>97</b>
4.1 Model HILL 48 - srovnání numerických a reálných výsledků	97
4.2 Model HILL 48 a VEGTER - porovnání výsledků	98
4.3 Model HILL 48 a VEGTER - porovnání podmínek plasticity	100
4.4 Model HILL 48 - porovnání hrubé a jemné sítě	100
4.5 Model HILL 48, VEGTER a reálný experiment - srovnání zjištěných hodnot	102
<b>5. ZÁVĚR</b>	<b>104</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>106</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení:	Jednotka:	Význam:
$A_0$	[J]	Spočítaná práce pod křivkou (směr 0°)
$A_{90}$	[J]	Spočítaná práce pod křivkou (směr 90°)
$A_x$	[%]	Tažnost materiálu
$Al$	[-]	Hliník
$ASF$	[-]	Audi Space Frame
$B_0$	[mm]	Počáteční šířka zkušební vzorku
$B_1$	[mm]	Konečná šířka zkušební vzorku
$C$	[MPa]	Modul monotónního zpevnění
$CAD$	[-]	Computer Aided Design
$CAE$	[-]	Computer Aided Engineering
$CCD$	[-]	Charge-Coupled Device
$Cu$	[-]	Měď
$D_0$	[mm]	Průměr kruhového přístřihu
$D_{0max}$	[mm]	Maximální průměr kruhového přístřihu
$D_1$	[mm]	Průměr obvodu výtažku
$DC04$	[-]	Hlubokotažná ocel
$D_{MAX}$	[mm]	Maximální rozměr otvoru
$D_{MIN}$	[mm]	Minimální rozměr otvoru
$DT$	[-]	Dolní tažnice
$d$	[mm]	Průměr tažníku
$d'$	[mm]	Poměrné rozšíření otvoru
$d_{\alpha 1}$	[-]	Přírůstek úhlu ve směru 1
$d_{\alpha 2}$	[-]	Přírůstek úhlu ve směru 2
$dF$	[-]	Přírůstek síly
$d_{ht}$	[mm]	Vnitřní průměr horní tažnice
$E$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$F$	[N]	Zatěžující síla
$FLC$	[-]	Forming Limit Curve
$F_P$	[N]	Maximální tažná síla
$F_T$	[N]	Tažná síla
$F_U$	[N]	Přidržovací síla
$F_e$	[N]	Síla odpovídající výrazné mezi kluzu

Označení:	Jednotka:	Význam:
$F_{eD}$	[N]	Síla odpovídající dolní mezi kluzu
$F_{eH}$	[N]	Síla odpovídající horní mezi kluzu
$F_{max}$	[N]	Největší zatěžující síla
$F_{p0,2}$	[N]	Síla odpovídající deformaci $\varepsilon = 0,002$
$F_u$	[N]	Uzavírací síla
$f$	[-]	Koeficient tření
$HT$	[-]	Horní tažnice
$h$	[mm]	Výška kalíšku
$h_{max}$	[mm]	Maximální výška kalíšku
$h_{min}$	[mm]	Minimální výška kalíšku
$h_v$	[mm]	Výška vyboulení
$IE$	[mm]	Index dle Erichsena
$IGS$	[-]	International Graphics Specification
$J$	[-]	Ukazatel tvařitelnosti
$K$	[-]	Koeficient tažení
$KUT$	[-]	Komplexní ukazatel tvařitelnosti
$k$	[-]	Koeficient zaplnění tahového diagramu
$L$	[mm]	Okamžitá délka tělesa
$L_0$	[mm]	Počáteční měřená délka vzorku
$L_1$	[mm]	Konečná měřená délka vzorku
$L_u$	[mm]	Délka vzorku při přetržení
$M$	[-]	Stupeň tažení
$MIG$	[-]	Metal Inert Gas
$Mg$	[-]	Hořčík
$n$	[-]	Exponent deformačního zpevnění
$O$	[-]	Kyslík
$p$	[Pa]	Tlak
$q$	[mm]	Ukazatel hlubokého tažení
$R$	[MPa]	Smluvní jmenovité napětí
$R_1$	[mm]	Poloměr zakřivení elementu ve směru 1
$R_2$	[mm]	Poloměr zakřivení elementu ve směru 2
$R_e$	[MPa]	Výrazná mez kluzu
$R_{eD}$	[MPa]	Dolní mez kluzu

Označení:	Jednotka:	Význam:
$R_{eH}$	[MPa]	Horní mez kluzu
$R_{ht}$	[mm]	Rádus horní tažnice
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Nevýrazná mez kluzu
$r_0$	[-]	Normálová anizotropie (směru 0°)
$r_{45}$	[-]	Normálová anizotropie (směru 45°)
$r_{90}$	[-]	Normálová anizotropie (směru 90°)
$r_M$	[mm]	Rádus tažnice u zkoušky dle Swifta
$r_s$	[-]	Střední hodnota normálové anizotropie
$r_{St}$	[mm]	Rádus tažníku u zkoušky dle Swifta
$r_v$	[mm]	Poloměr vyboulení plechu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Okamžitý průřez zkušební tělesa
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Původní průřez zkušební tělesa
$STL$	[-]	Stereolitografie
$Si$	[-]	Křemík
$s$	[mm]	Konečná tloušťka vzorku
$s_0$	[mm]	Počáteční tloušťka vzorku
$T$	[-]	Přirozený stupeň hlubokotažnosti
$t$	[s]	Čas
$t_0$	[mm]	Původní tloušťka plechu
$t_v$	[mm]	Tloušťka plechu na vrcholu vyboulení
$UH$	[-]	Ukazatel hlubokotažnosti
$V$	[mm <sup>3</sup> ]	Okamžitý objem
$V_0$	[mm <sup>3</sup> ]	Původní objem
$Z$	[%]	Kontrakce
$ZP$	[MPa]	Zásoba plasticity
$z$	[mm]	Délka dráhy tažníku
$\Delta L$	[mm]	Prodloužení zkušební tyčky
$\Delta r$	[-]	Hodnota plošné anizotropie
$\alpha$	[°]	Úhel při měření cípatosti
$\varepsilon_u$	[-]	Maximální poměrné prodloužení
$\varphi$	[-]	Skutečná deformace (přetvoření)
$\varphi_b$	[-]	Deformace ve směru šířky

Označení:	Jednotka:	Význam:
$\varphi_i$	[-]	Intenzita deformace
$\varphi_l$	[-]	Deformace ve směru délky
$\varphi_s$	[-]	Deformace ve směru tloušťky
$\varphi_0$	[-]	Ofsetová deformace
$\varphi_1$	[-]	Hlavní deformace
$\varphi_2$	[-]	Vedlejší deformace
$\varphi_3$	[-]	Vedlejší deformace ve směru tloušťky
$\sigma$	[MPa]	Skutečné napětí
$\sigma_i$	[MPa]	Intenzita napětí
$\sigma_k$	[MPa]	Skut. napětí na mezi kluzu
$\sigma_m$	[MPa]	Skut. napětí na mezi pevnosti
$\sigma_{p0,2}$	[MPa]	Skut. napětí u nevýrazné meze kluzu
$\sigma_{ref}$	[MPa]	Skut. napětí na referenční křivce
$\sigma_1$	[MPa]	Napětí ve stěně elementu (směr 1)
$\sigma_2$	[Mpa]	Napětí ve stěně elementu (směr 2)
$\sigma_3$	[Mpa]	Napětí ve stěně elementu (směr 3)
$\sigma_{90^\circ}$	[-]	Napětíový poměr pro směr $90^\circ$
$\sigma'_{90^\circ}$	[MPa]	Skut. napětí na křivce pro směr $90^\circ$

## 1. ÚVOD

Jedním z nejvýznamnějších odvětví nejen světového, ale i tuzemského hospodářství je v současnosti automobilový průmysl. Existuje velké množství automobilek, proto je na automobilovém trhu velmi velká konkurence a minimálně udržet krok s ostatními je velmi složitý úkol. Proto, aby byla v současnosti automobilka konkurenceschopná, musí neustále podporovat rozvoj například v oblasti materiálů, výrobních technologií nebo ekonomiky.

Karoserie je základní částí celého vozidla a kvalita karosářských výlisků je velmi důležitá, protože jsou na ně kladeny přísné požadavky jak z hlediska bezpečnosti, tak z hlediska estetiky. Karosářské výlisky mají nepravidelné tvary a nejvíce uplatňovanou technologií výroby těchto tvarově různorodých součástí je technologie tažení. Aby byl splněn požadavek na vysokou kvalitu tvářených karosářských dílů, musí již před samotným tvářením součásti proběhnout dokonalá předvýrobní příprava, která je v dnešní době spojená s numerickou simulací výrobního procesu.

Pro potřeby numerické simulace je důležité zjistit pro daný materiál jeho charakteristické vlastnosti. V této diplomové práci bylo pracováno s materiálem AlMg3, což je hliníková slitina, která obsahuje 3 % hořčíku. V rámci této práce je také prováděna numerická simulace procesu tažení, proto musely být zkoumány i charakteristické vlastnosti použitého materiálu. Tento materiál byl vybrán, protože hliník a jeho slitiny mají v konstrukci automobilů široké využití. Mezi hlavními důvody, díky kterým nachází hliník v automobilovém průmyslu uplatnění, jsou hlavně nízká měrná hmotnost, se kterou například souvisí úspora pohonných hmot, dále dobrá tvárnost a dobrá korozní odolnost.

Teoretická část této práce se zabývá hliníkem a jeho slitinami, s tím souvisí i popis trendů ve snižování hmotnosti automobilů. V teorii jsou ještě popsány základní a technologické zkoušky pro zjišťování tvařitelnosti plechů, dále bezkontaktní optické metody sloužící pro měření deformací při lisovacích procesech nebo numerické simulace s výpočtovým modelem podle Vegtera, který byl v experimentu použit.

V experimentální části diplomové práce je popsán průběh a vyhodnocení měřených zkoušek (statická zkouška tahem, hydraulická zkouška vyboulováním, kalíšková zkouška), postup a vyhodnocení numerické simulace lisovacího procesu (tažení kalíšku) s použitými výpočtovými modely dle Hilla 48 a Vegtera. V závěru experimentu jsou pak vyhodnoceny zjištěné výsledky a následně mezi sebou vzájemně porovnány.

Cílem této práce je stanovení vlivu výpočtového modelu na přesnost numerické simulace v programu PAM-STAMP 2G, porovnání obou výpočtových modelů (model dle Hilla 48 a model dle Vegtera) mezi sebou a jejich srovnání s reálným experimentem.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Trendy ve snižování hmotnosti osobních automobilů [1, 2]

Jedním z velmi důležitých prvků při vývoji osobních automobilů je kladení důrazu na snižování hmotnosti. Dosažení menších hmotností automobilů, při zachování dalších důležitých parametrů vozidla, je jedním z klíčových úkolů konstruktérů. Menší hmotnost vozidla pozitivně ovlivňuje jeho dynamiku, spotřebu paliva, energii, která je nezbytná pro rozjezd, s tím může souviset i použití menších motorů, což zase vede ke zmenšení požadavků na dimenzování komponentů převodového ústrojí, hnací soustavy nebo chlazení. Nižší hmotnost má také příznivý vliv na kinetickou energii, což znamená, že je možno použít menší, a tím i lehčí brzdy. Hmotnost by se měla snižovat na takových místech osobního automobilu, kde má opravdu význam, například na elementech, které mají přímý účinek na žádoucí posun těžiště, nebo na neodpružených částech (jedná se o specifickou skupinu součástí, tzv. neodpružené hmoty). Mezi neodpružené hmoty vozidla se řadí kola, brzdové kotouče a části náprav. Na druhou stranu musí být snižování hmotnosti vozidel také v souladu s neustále rostoucími nároky na bezpečnost, komfort a vybavení.

Snaha o dosažení nižších hmotností se uplatňuje v konstrukci všech skupin automobilů. Příkladem je i konstrukce karoserií, kde je využíváno kombinovaných konstrukčních variant. Kombinace spočívá v použití hliníkové přední části s ocelovou strukturou prostoru pro posádku. Tento přístup je například zřejmý na automobilech značky BMW řady 7, které jsou charakteristické tím, že většina povrchových dílů karoserie je vyrobena z hliníku. Dalším způsobem jak účinně snižovat hmotnost je třeba technologie výroby litých kol, která mají duté paprsky. Podle propočtů může tato technologie uspořit až 6 kg neodpružené hmotnosti na celém vozidle. Vývojová centra světových automobilek bez přestání vyvíjejí nejenom nové koncepce a technologie, ale také se zabývají vývojem nových materiálů. Proto pro rozličné díly nacházejí uplatnění plasty, hliníkové slitiny nebo další specializované materiály, jako třeba vysokopevnostní hliníkové plechy, kovové pěny, sendvičové moduly, ultra vysokopevnostní oceli nebo také karbon.



**Obr. 2.1 - BMW 750Li (2008)**

## **2.1.1 Nižší hmotnost osobního automobilu a její výhodné vlivy [3, 4]**

### **2.1.1.1 Vliv na dynamické schopnosti automobilu**

Mezi dynamické schopnosti vozidla jsou považovány zejména zrychlení a maximální rychlost. Tyto schopnosti jsou dány hnacím ústrojím a odporovými silami (jízdními odpory). Odporové síly jsou síly působící proti směru pohybu automobilu a tvoří tak jízdní odpory. Mezi tyto jízdní odpory se řadí odpor zrychlení, odpor vzduchu nebo odpor stoupání. Odpor zrychlení je setrvačná síla působící proti směru zrychlení a je složena ze dvou složek; z odporu zrychlení rotujících částí (kola, brzdové kotouče, rotační části motoru, atd.) a z odporu zrychlení posuvných částí (karoserie, podvozek, atd.). Vzhledem k tomu, že odpor zrychlení závisí na hmotnosti součástí, tak má hmotnost podstatný vliv na jízdní výkon automobilu.

### **2.1.1.2 Vliv na hospodárnost automobilu**

S hospodárností automobilu úzce souvisí spotřeba paliva. Velikost spotřeby paliva (obvykle v litrech/100 km) závisí v první řadě na režimu, ve kterém pracuje jednotka starající se o pohon automobilu. Jak již bylo uvedeno výše čím nižší hmotnost vozidla, tím nižší odpor zrychlení. Tím pádem je možno daného zrychlení dosáhnout menší hnací silou a motor může pracovat při nižším zatížení. A tím klesá spotřeba paliva a do ovzduší se dostane menší množství výfukových plynů (oxid uhličitý, oxid uhelnatý, nespálené uhlovodíky nebo oxidy dusíku) a pevných částic (pevný uhlík - saze).

### 2.1.1.3 Vliv na jízdní vlastnosti

K jízdním vlastnostem automobilu se řadí jeho ovladatelnost a jeho chování při zatáčení. Aby bylo možno hodnotit jízdní vlastnosti vozidla, nestačí se zabývat pouze hmotností, ale také i umístěním těžiště automobilu, ve kterém je uvažováno působíště odstředivých a tíhových sil. Kromě hmotnosti vozidla a polohy těžiště jsou jízdní vlastnosti ovlivněny ještě také rozložením hmotnosti na nápravy. Rozložení hmotnosti mezi nápravy lze zásadně ovlivnit základní koncepcí uspořádání automobilu. Teoreticky nejlepší uspořádání při pohonu obou náprav je s motorem uprostřed. Při pohonu zadní nápravy je to zase s motorem před zadní nápravou. Ovšem především kvůli omezování prostoru posádky se toto teoretické uspořádání nevyužívá. U běžných osobních automobilů se proto využívá méně výhodného uspořádání s motorem vpředu. Poslední větší aspekt, který má ještě vliv na jízdní vlastnosti, je hmotnost neodpružených částí vozidla (kola, brzdové kotouče, atd.). Menších hmotností neodpružených hmot lze například dosáhnout použitím karbonkeramického kompozitu, jehož hmotnost je asi čtvrtinová oproti běžně používaným ocelovým kotoučům, nebo uplatněním slitin hliníku při konstrukci dílů náprav. Nižší hmotnost neodpružených hmot také zvyšuje bezpečnost jízdy a zlepšuje pohodlí při jízdě. Lepších vlastností z hlediska ovladatelnosti je tedy dosaženo u vozidel, která jsou lehčí, která mají polohu těžiště co nejnižší, u kterých se rozložení hmotnosti mezi nápravami blíží co nejvíce ideálnímu stavu a u kterých je velikost hmotnosti neodpružených částí co nejmenší.

### 2.1.2 Využití hliníku a jeho slitin v automobilovém průmyslu [4]

Hlavním argumentem pro využívání hliníku a jeho slitin v konstrukci automobilů je jeho nízká měrná hmotnost, dobrá tvárnost a dobrá odolnost proti korozi. S využitím tohoto materiálu jsou však také spojeny i některé stinné stránky, jako například vyšší cena nebo horší spojování oproti ocelím.

Podle toho, v jakých částech osobních automobilů se hliník využívá, lze udělat rozdělení na vnitřní prostory (interiér) a na vnější prostory (exteriér).

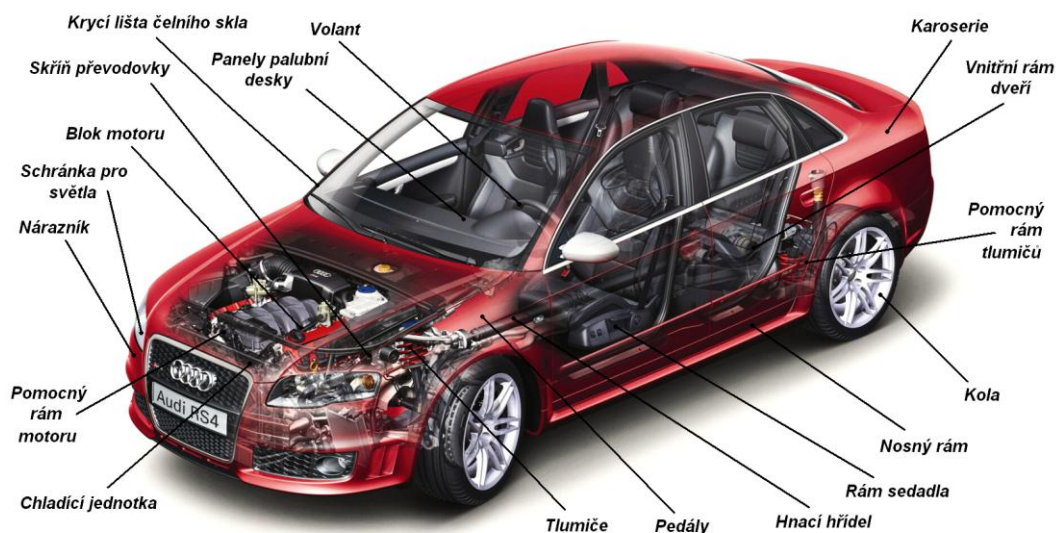
#### ***Vnitřní prostory:***

palubní deska, součásti sedadel, vnitřní rámy dveří, ramena pedálů, volant, kryty rádia, schránky pro airbag, schránky pro dálková světla

#### ***Vnější prostory:***

karoserie, ráfky kol, střešní panely, blok motoru, kryt motoru, kryty hlav válců, písty, skříň převodovky, sací potrubí





Obr. 2.2 - Ukázka použití slitin hliníku v konstrukci automobilu

### 2.1.3 Konstrukce karoserií [5, 6, 7, 8]

Použití hliníkových slitin je velice rozmanité a každý výrobce má vlastní způsoby jejich aplikace. Asi nejdále ve znalostech hliníku, hliníkových slitin a v jejich aplikaci především v oblasti karosérií je německá automobilka Audi. Náskok proti konkurenčním automobilkám v tomto oboru zajišťuje Audi především speciální Centrum hliníku, které bylo založeno v roce 1994. Právě v tomto Centru vznikaly vozy jako Audi A8 nebo Audi A2, které jsou charakteristické svými hliníkovými karosériemi. Audi je automobilka s největším počtem sériově vyrobených a prodaných vozů s celohliníkovou karosérií. Tajemství tohoto prvenství spočívá u Audi ve využití nosného prostorového rámu v konstrukci karoserie tzv. Audi Space Frame (zkráceně ASF). Více o ASF je rozepsáno v následující kapitole (kap. 2.1.3.1).

#### 2.1.3.1 Audi Space Frame (ASF)

Jedná se o vysoce tuhou a pevnou rámovou strukturu. Jednotlivé segmenty rámu ASF jsou vyrobeny metodou protlačování. Na tento rám jsou následně integrovány vnější panely karoserie, které jsou lisovány z hliníkových plechů. Karoserie Audi A8 a Audi A2 jsou proto považovány za nejlehčích ve svých třídách. Automobilka Audi uvádí, že nosný prostorový rám limuzíny A8 má hmotnost okolo 250 kg. V porovnání s obvyklou hmotností ocelové karoserie u vozidel stejné velikosti je to asi o 200 kg méně. Úspora hmotnosti je tedy přibližně 44 %. Podobné procentuální uspoření hmotnosti je i u malého modelu A2. Největší výhodou ASF je nízká hmotnost karoserie, se kterou souvisí lepší ovladatelnost vozidla, nižší spotřeba pohonných hmot a lepší jízdní výkony. K dalším pozitivům patří

vyšší bezpečnost jízdy, vyšší tuhost karoserie nebo možnost lisovat tvarově mnohem složitější díly a profily, než v případě ocelového plechu. Zápornou stránkou těchto rámců je cena jejich opravy v případě dopravních nehod. Metody spojování rámců jsou například nýtování nebo svařování (metoda MIG, laser).



**Obr. 2.3 - Nejnovější generace ASF u nového Audi A8**



**Obr. 2.4 - Nosný prostorový rám ASF u Audi A2**

#### **2.1.4 Konstrukce hnacího ústrojí [4, 9]**

Hliníkové slitiny se podle technologie zpracování dělí na slitiny tvářené, které se z velké části používají v oblasti karoserií a slitiny na odlitky, které lze zase hledat v konstrukci hnacího ústrojí vozidel. Hliníkové slitiny v oblasti hnacího ústrojí jsou uplatňovány například při výrobě skříní převodovek, bloků motorů, hlav válců, pístů, sacích potrubí, chladičů atd. Z důvodu obtížnosti výroby některých tvarově složitých součástí (skříní převodovky, bloku motoru) se hlavní technologií výroby stává odlévání.



**Obr. 2.5 - Skříň převodovky Audi A3 (rok 1998)**

#### **2.1.4.1 Blok motoru**

Při využití bloků motorů z hliníkových slitin lze například u motorů V8 dosáhnout úspory hmotnosti až 30 kg. To má za následek rovnoměrné rozložení hmotnosti mezi nápravy a snížení zatížení nápravy, což se pozitivně projevuje na ovladatelnosti vozidla.



**Obr. 2.6 - Blok motoru V8 u Chevrolet Corvette Z06 (rok 2006)**

#### **2.1.4.2 Litá kola**

Použití litých kol ze slitin hliníku má několik výhod. Vedle zlepšení vzhledové stránky vozu je to zejména snížení hmotnosti oproti klasickým ocelovým diskům. Toto snížení hmotnosti lze pak také třeba využít ve zvětšení rozměrů vůči běžným ráfkům. Zvětšením průměru a šířky kol lze dospět k většímu pohodlí při jízdě a vyšší stabilitě při průjezdu zatáčkami. Díky velmi dobré korozní odolnosti hliníku je další předností litých kol jejich odolnost vůči korozi. S tím souvisí i jejich vyšší životnost. Litá kola jsou vyráběna z hliníkových slitin Al-Si-Cu, Al-Si-Mg.



**Obr. 2.7 - Lité kolo z hliníkových slitin**

#### 2.1.4.3 Chladič

Chladič (chladicí systém) je používán k ochlazení chladicí kapaliny motoru, tím se motor nepřehřívá a nedochází k jeho trvalému poškození. Slitin hliníku se u tohoto systému využívá v konstrukci výměníků nejen ke snížení hmotnosti, ale také pro zajištění správné funkce této chladicí jednotky.



Obr. 2.8 - Chladicí systém osobního automobilu

#### 2.1.4.4 Písty

Písty spalovacích motorů jsou vyráběny z hliníkových slitin - silumínů. Obsah přídavného křemíku se pohybuje v rozmezí 12 až 18 %. Metodou, pomocí které jsou nejčastěji vyráběny písty, je gravitační lití.



Obr. 2.9 - Píst motoru Nissan SR20DE

### 2.2 Hliník a slitiny hliníku [9, 10, 11]

Hliník a jeho slitiny se vedle ocelí řadí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Základní surovina, která se uplatňuje při výrobě hliníku, se nazývá bauxit (v čistém stavu oxid hlinitý -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Výroba hliníku přímou redukcí běžnými hutnickými metodami není možná, protože hliník má vysokou afinitu ke kyslíku. K výrobě hliníku se proto využívá elektrolýza, při které dochází k elektrolytickému rozkladu oxidu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nevýhodou je, že k tomuto elektrolytickému rozkladu je potřeba velké množství energie. Výroba se tak stává energeticky náročnější, což se samozřejmě projevuje na

ceně hliníku i jeho slitin. Jelikož jsou vlastnosti hliníku a jeho slitin z technického hlediska velmi zajímavé, je tento materiál velice rozšířený a uplatňuje se ve velkém množství odvětví, od karosářských výrobků v automobilovém průmyslu, přes elektrické kondenzátory v elektrotechnice, až po obaly v potravinářském průmyslu.

### 2.2.1 Čistý hliník [9, 10, 11, 12]

Vlastnosti, ve kterých tento materiál vyniká, jsou nízká měrná hmotnost, výborné tvárné vlastnosti za tepla i za studena, velice výhodný poměr měrné hmotnosti ku pevnosti, dále velmi dobrá tepelná a elektrická vodivost. Další zajímavou charakteristikou je závislost čistoty hliníku na pevnosti. Je zjištěno, že při čistotě 99,99 % lze zpevněním docílit pevnosti jen 120 MPa, ovšem při čistotě 99,5 % lze dosáhnout již 200 MPa pevnosti. Na čistotě závisí také elektrická vodivost. Hliník také dobře čelí slabým kyselinám, je korozně odolný a na běžné atmosféře se jeho povrch rychle pokrývá oxidem hlinitým, který zastavuje nebo zpomaluje další oxidaci. Přirozená vrstva oxidu hlinitého na povrchu hliníku má tloušťku 0,0001 mm. Tuto tloušťku je možno uměle zvýšit (až na několik setin milimetru) elektrolyticky pomocí anodické oxidace. Z technického hlediska je však nepříjemné, když hliník přijde ve vlhkém prostředí do styku s jiným kovem, který má vyšší hodnotu elektrochemického potenciálu (např. železo), protože díky tomu se ochranný účinek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu hliníku (i většiny jeho slitin) velice brzy ztrácí a hliník koroduje. Pro zamezení koroze hliníku se využívá negativnějších materiálů (zinek, kadmium), než je samotný hliník. Ochrana spočívá v tom, že se ocel v místě styku s hliníkem zinkuje nebo kadmiuje. Mezi další nevýhody lze také zařadit nízkou tvrdost.

Pro přehled jsou základní fyzikální, mechanické a technologické vlastnosti hliníku zapsány v následující tabulce. Tabulka je pro informaci také doplněna základními vlastnostmi jiných materiálů, které slouží pro porovnání.

Tab. 2.1 - Fyzikální a mechanické vlastnosti základních materiálů

Fyzikální a mechanické vlastnosti				
	Hliník	Měď	Nikl	Zinek
Hustota [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]	2700	8960	8908	7140
Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	660	1084	1455	420
Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$ ]	229	395	89	120
Měrná elektrická vodivost [ $\mu\text{S} / \text{m}$ ]	37	56	15	17
Tvrdost [HB]	35	50	85	31
Modul pružnosti v tahu [MPa]	66000	120000	205000	100000
Součinitel tepl. délk. roztažnosti [ $10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	0,024	0,017	0,013	0,029



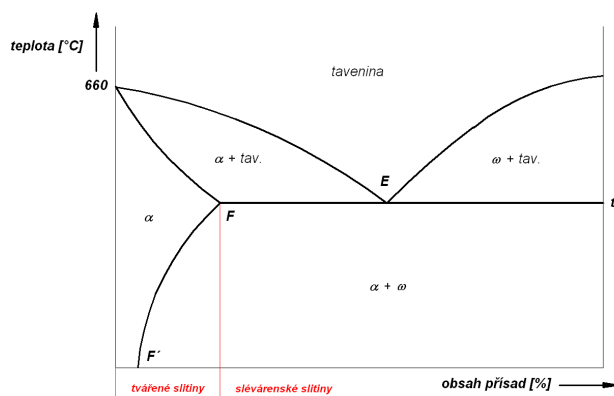
Tab. 2.2 - Technologické vlastnosti hliníku

Technologické vlastnosti hliníku	
Tvárnost za tepla	velmi dobrá
Tvárnost za studena	velmi dobrá
Slévatelnost	omezená
Svařitelnost	dobrá (všemi způsoby)
Pájitelnost	dobrá
Odolnost proti korozi	velmi dobrá

### 2.2.2 Slitiny hliníku [9, 10, 11, 12, 13, 14]

Mechanické vlastnosti hliníku lze upravovat poměrně malými přísadami jiných prvků, například mědí, niklem, zinkem, hořčíkem atd. Procentuální zastoupení hliníku ve většině slitin je větší jak 90 %. Slitiny hliníku se dělí na dvě základní skupiny a to: slitiny určené pro tváření a slitiny určené pro odlévání. Slitiny hliníku, které jsou určené pro tváření, lze ještě dále dělit na slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi, ale omezenou korozní odolností a na slitiny se středními mechanickými vlastnostmi, avšak velmi dobrou korozní odolností. V rámci této diplomové práce je pracováno s hliníkovou slitinou AlMg3, takže teorie bude směřovat jen k této slitině. Slitiny skupiny Al-Mg se mohou používat jak pro tváření, tak i pro odlévání. S ohledem na tváření lze tuto slitinu zařadit mezi slitiny se středními mechanickými vlastnostmi a s vysokou odolností proti korozi. Tyto hliníkové slitiny neobsahují měď, proto mají dobrou korozní odolnost a to i bez povrchové ochrany. Dalšími kladnými vlastnostmi jsou dobrá tvařitelnost, svařitelnost, lomová houževnatost a odolnost proti vibračnímu zatížení.

Jak je patrné z následujícího obrázku, tak k tváření jsou vhodné slitiny s nižšími obsahy přísad a to do koncentrace, která odpovídá bodu F. Ke slévání jsou zase vhodné slitiny s vyšším obsahem přísadové části (od bodu F), které jsou hůře tvárné za tepla, ale mají dobré slévárenské vlastnosti.



Obr. 2.10 - Rozdělení slitin hliníku

### 2.2.2.1 Skupina Al-Mg

Do této skupiny patří hliníkové slitiny řad AlMg2, AlMg3, AlMg5, AlMg6, AlMg7. Číslo na konci názvu těchto slitin označuje procentuální obsah hořčíku. Hořčíku se přidává maximálně do 9 %. S obsahem přidaného hořčíku souvisí také pevnost materiálu. Platí závislost, že čím je větší obsah hořčíku, tím se zvyšuje pevnost hliníku, ovšem klesá tvárnost. U slitin AlMg2 je tvárnost ještě velmi dobrá, ale se zvyšujícím se přidavkem hořčíku hodnoty tvárnosti rychle klesají. Naopak vzrůstá korozní odolnost. Mimo velmi dobré korozní odolnosti jsou tyto slitiny také dobře svařitelné a dají se velmi dobře leštit. Pevnost slitin Al-Mg není velká, pohybuje se v rozmezí od 100 až 170 MPa (v žíhaném stavu). Pevnost lze zvýšit deformačním zpevněním až na hodnotu  $R_m = 400$  MPa. Stupeň deformace se pohybuje mezi 20 až 30 %. Při větších hodnotách deformace ovšem výrazně klesá tvárnost a odolnost proti korozi. Uplatnění těchto hliníkových slitin je zejména v potravinářském průmyslu.

Zkoušený materiál, se kterým byl prováděn experiment, byl pořízen od firmy Alcom Alval s.r.o. Přesné označení tohoto materiálu je EN AW-5754 H111. Materiál byl dodán ve formě plechu o rozměrech 1000 x 2000 mm. Z tohoto plechu byly poté zhotoveny zkušební vzorky, na kterých bylo prováděno experimentální měření. Fyzikální, technologické a mechanické vlastnosti této slitiny hliníku s označením EN AW-5754 H111 jsou znázorněny v následujících tabulkách.

**Tab. 2.3 - Fyzikální, technologické a mechanické vlastnosti použité slitiny**

Fyzikální vlastnosti	
Hustota [kg / m <sup>3</sup> ]	2680
Rozsah teploty tání [°C]	590 ÷ 645
Součinitel teplotní délkové roztažnosti [10 <sup>-3</sup> * K <sup>-1</sup> ]	0,0238
Odpor při 20°C [μΩ * cm]	5,3
Měrná tepelná kapacita [J / kg * K]	945
Technologické vlastnosti	
Svařitelnost	Hodnocení
Elektrický oblouk	Velmi dobré
Inertní plyn	Velmi dobré
Pájení	Přijatelné
Obrobitelnost	Hodnocení
Odlamování třísek při obrábění	Přijatelné
Lesk opracovaného povrchu	Velmi dobré
Korozní odolnost	Hodnocení
Atmosférická	Velmi dobré
Proti mořské vodě	Velmi dobré
Vhodnost k eloxování	Hodnocení
Ochranný	Velmi dobré
Lesklý	Dobré
Tvrдый	Velmi dobré

Mechanické vlastnosti (pro stav materiálu H111)	
Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	190 ÷ 240
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	80
Tažnost $A_{50mm}$ [%]	14
Tvrdost [HBW]	52
Modul pružnosti v tahu $E$ [MPa]	70000

## 2.3 Tvařitelnost při plošném tváření [15]

Plošné tváření obsahuje velké množství technologií, při nichž se stavy napjatosti v jednotlivých úsecích procesu mění od jednoosého tahu, přes smyk, ke kombinaci tah a tlak, až po dvouosý tah.

Tvařitelnost při plošném tváření je obecně definována jako schopnost materiálu prodělat nevratnou, žádoucí změnu tvaru bez makroskopického porušení. Tvařitelnost plechů je charakterizována pomocí základních a technologických zkoušek.

### 2.3.1 Základní zkoušky [15, 16, 17, 18]

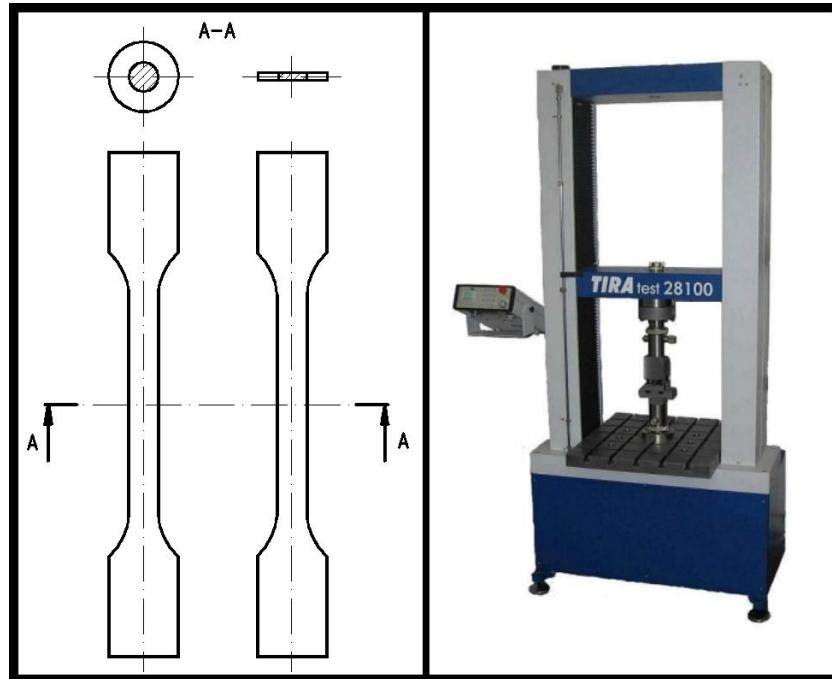
Jedná se o normalizované zkoušky, které se používají ke zjišťování základních mechanických vlastností materiálů. Mezi základní zkoušky se řadí tahová zkouška, pěchovací (tlaková) zkouška, zkouška ohybem, stříhem a krutem. Tyto zkoušky ovšem dostatečně necharakterizují chování materiálu při dané výrobě, proto je z praktického hlediska výhodnější splnit požadavky běžné praxe hodnocením materiálu spíše pomocí technologických zkoušek. Ze základních zkoušek byla v této diplomové práci uplatněna pouze statická zkouška tahem, proto je v teoretické části uvedena jen tato zkouška.

#### 2.3.1.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem patří mezi základní mechanické zkoušky. Jedná se o normalizovanou zkoušku (ČSN EN ISO 6892-1). Norma například udává podmínky, při kterých je zkouška vykonávána (teplota, deformační rychlost atd.) anebo popisuje tvar a rozměry zkušebních vzorků. Zkušební tělíska jsou jednoduchého tvaru, nejčastěji mají kruhový nebo obdélníkový průřez. Tvar zkušebních vzorků pro statickou zkoušku tahem je znázorněn na obrázku 2.11. Zkušební tyčka se upíná do čelistí zkušebního trhačního stroje a leží poté v jeho ose. Upnutý zkušební vzorek je potom namáhán tahovým zatížením. Čím vzrůstá tahové namáhání, tím roste i deformace a vzorek se prodlužuje. Zkouška je ukončena při přetržení zkušebního tělíska. V průběhu



zkoušky je zaznamenávána závislost mezi osovou tahovou silou  $F$  a prodloužením zkušební tyčky  $\Delta L$ , které se měří přiloženým průtahoměrem.



Obr. 2.11 - Statická zkouška tahem (obr. vlevo - zkušební vzorky, obr. vpravo - zkušební stroj)

### Smluvní a skutečný diagram statické zkoušky tahem

Jak je již napsáno výše, tak při tahové zkoušce se zaznamenávají hodnoty zatěžující tahové síly  $F$  a hodnoty prodloužení vzorku  $\Delta L$ . Grafická závislost mezi těmito hodnotami se nazývá pracovní diagram. Pracovní diagram se ovšem při vyhodnocování nepoužívá, protože nebere v úvahu průřez zkušebního vzorku, což by při porovnání stejných materiálů o různých průřezích byl problém. Hodnoty z pracovního diagramu se přepočítávají na smluvní hodnoty a dále pak na skutečné hodnoty, ze kterých se pak tvoří smluvní a skutečný diagram statické zkoušky tahem.

#### Přepočet z pracovního na smluvní diagram

Vztažením síly  $F$  na výchozí průřez  $S_0$  nezatíženého vzorku se dostane smluvní jmenovité napětí  $R$ .

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde:

$F$  - zatěžující síla [N]

$S_0$  - původní průřez zkušebního tělesa [mm<sup>2</sup>]

Prodloužení tyče  $\Delta L$  se vyjadřuje jako poměrné prodloužení  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (2)$$

kde:  $L$  - délka tělesa v daném okamžiku zatěžování [mm]  
 $L_0$  - původní délka zkušební vzorku [mm]

Smluvní diagram je závislost mezi smluvním napětím  $R$  a poměrným prodloužením  $\varepsilon$ .

#### Přepočet ze smluvního na skutečný diagram

Přepočet smluvního jmenovitého napětí  $R$  na skutečné napětí  $\sigma$  je odvozen ze zákona zachování objemu  $V_0 = V$ , který platí do meze pevnosti.

$$V_0 = V \quad (3)$$

Vztah (3) lze rozepsat do následujícího tvaru a upravit ho:

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \Rightarrow \frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

Kombinace vztahů (2) a (4) dává následující vztah:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 = \frac{S_0}{S} - 1 \Rightarrow \frac{S_0}{S} = \varepsilon + 1 \quad (5)$$

Pro přepočet smluvního diagramu na skutečný diagram je třeba znát vztah pro výpočet skutečného napětí  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde:  $S$  - okamžitý průřez zkušební tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

Když se ze vztahů (1) a (6) vyjádří zatěžující síla  $F$  a vytvořené vztahy se poté dají do rovnosti, vznikne vztah (7), ze kterého lze již vyjádřit skutečné napětí  $\sigma$  (8).

$$R \cdot S_0 = \sigma \cdot S \quad (7)$$

$$\sigma = R \cdot \frac{S_0}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

Vztah (8) lze ještě za pomoci vztahu (5) upravit do tvaru:

$$\sigma = R \cdot (\varepsilon + 1) \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

kde:  $\sigma$  - skutečné napětí [MPa]

Přepočet smluvní deformace (poměrného prodloužení)  $\varepsilon$  na skutečnou deformaci (skutečné přetvoření)  $\varphi$  je odvozen následovně:

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \Rightarrow \varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (10)$$

S pomocí vztahu (5) lze napsat:

$$\frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \quad (11)$$

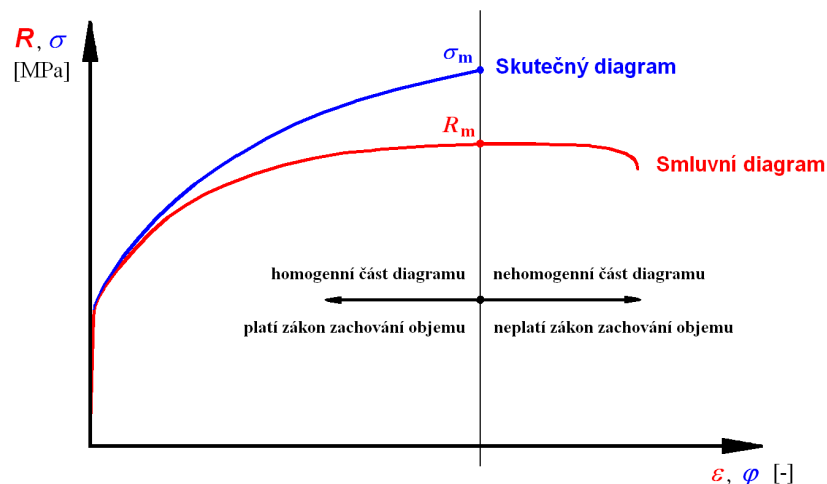
Po dosazení vztahu (11) do vztahu (10) se dostane výsledný vztah pro skutečnou deformaci  $\varphi$ .

$$\varphi = \ln(\varepsilon + 1) \quad [-] \quad (12)$$

kde:  $\varphi$  - skutečná deformace [-]

Skutečný diagram je závislost mezi skutečným napětím  $\sigma$  a skutečným přetvořením  $\varphi$ .

Na následujícím obrázku je pro názornost znázorněn smluvní i skutečný diagram v jednom grafu.



Obr. 2.12 - Smluvní a skutečný diagram statické zkoušky tahem

## Vyhodnocení statické zkoušky tahem

Z naměřených dat ze statické zkoušky tahem lze získat velmi důležité hodnoty a údaje, které nám poskytují informace o zkoušeném materiálu nejen z hlediska pružnosti a pevnosti, ale také z hlediska vhodnosti materiálu k dané technologii. Vyhodnocované údaje lze tedy rozdělit na ukazatele základní a na ukazatele tvařitelnosti.

### Základní ukazatele vyhodnocené ze zkoušky tahem

#### 1) Mez pevnosti $R_m$

Jedná se o smluvní hodnotu napětí daného podílem největší zatěžující síly  $F_{\max}$ , kterou snese zkušební vzorek o původním průřezu  $S_0$ .

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

kde:  $F_{\max}$  - největší zatěžující síla [N]  
 $S_0$  - původní průřez zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

#### 2) Mez kluzu $R_e$

Jedná se o minimální napětí, při kterém vznikají plastické deformace. Mez kluzu lze dělit na výraznou a nevýraznou. U výrazné meze kluzu  $R_e$  lze ještě rozlišovat dolní mez kluzu  $R_{eD}$  a horní mez kluzu  $R_{eH}$ . U nevýrazné meze kluzu  $R_{p0,2}$  se vychází ze síly, která odpovídá absolutní deformaci  $\varepsilon = 0,002$ . Porovnání výrazné a nevýrazné meze kluzu je zobrazeno na obrázku 2.13.

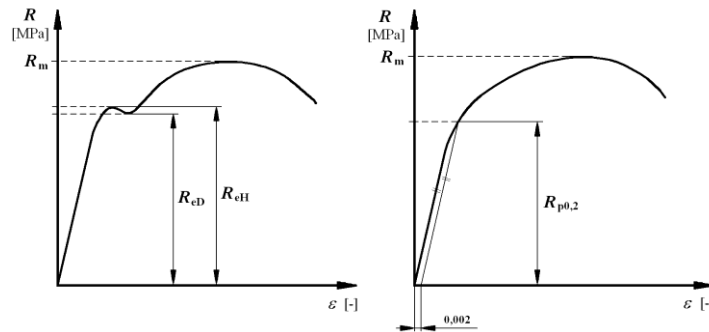
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (14)$$

$$R_{eD} = \frac{F_{eD}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (16)$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

kde:  $F_e$  - síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]  
 $F_{eD}$  - síla odpovídající dolní mezi kluzu [N]  
 $F_{eH}$  - síla odpovídající horní mezi kluzu [N]  
 $F_{p0,2}$  - síla odpovídající deformaci  $\varepsilon = 0,002$  [N]



**Obr. 2.13 - Mez kluzu v tahu (obr. vlevo - výrazná mez kluzu, obr. vpravo - nevýrazná mez kluzu)**

### 3) Tažnost $A_x$

Jedná se o maximální poměrné prodloužení  $\varepsilon_u$  vyjádřené v procentech.

$$A_x = \varepsilon_u \cdot 100 = \frac{\Delta L_u}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (18)$$

kde:

$\varepsilon_u$  - maximální poměrné prodloužení [-]

$L_u$  - délka vzorku při přetržení [mm]

$L_0$  - původní délka zkušebního vzorku [mm]

### 4) Kontrakce $Z$

Kontrakce (neboli zúžení průřezu) je dána poměrem zúžení průřezu tyčky při přetržení  $\Delta S$  k původnímu průřezu tyčky  $S_0$ . Vyjadřujeme ji také v procentech.

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (19)$$

kde:

$S$  - průřez tyčky při přetržení [mm<sup>2</sup>]

$S_0$  - původní průřez tyčky [mm<sup>2</sup>]

### Ukazatele tvařitelnosti vyhodnocené ze zkoušky tahem

#### 1) Komplexní ukazatel tvařitelnosti KUT

$$KUT = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \cdot A_x \quad [-] \quad (20)$$

kde:

$R_m$  - mez pevnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$  - mez kluzu v tahu [MPa]

$A_x$  - tažnost (není brána v procentech) [-]

## 2) Ukazatel hlubokotažnosti UH

$$UH = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \quad [-] \quad (21)$$

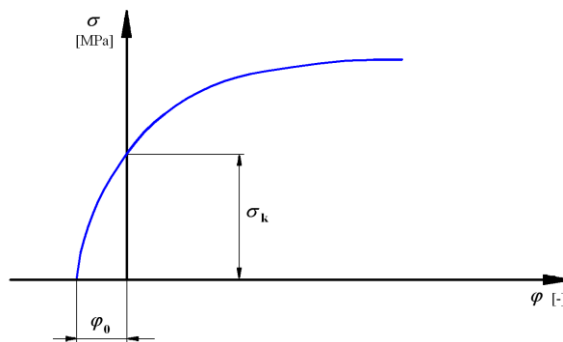
## 3) Zásoba plasticity ZP

$$ZP = (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_x \cdot k \quad [\text{MPa}] \quad (22)$$

kde:  $k$  - koeficient zaplnění tahového diagramu [-]

## Aproximace statické zkoušky tahem

Aproximace statické zkoušky tahem se provádí podle příslušné normy a používá se pro stanovení charakteristických vlastností zkoumaného materiálu. Aproximace je také důležitá při simulování tvářecího procesu. Existuje samozřejmě více druhů a způsobů aproximace, ale v rámci této diplomové práce byla pro materiál AlMg3 použita aproximace podle Swift-Krupkowski, která je využívána pro neželezné kovy. Aproximace je aplikována na skutečný diagram statické zkoušky tahem ( $\sigma - \varphi$ ) a je prováděna v určitém rozmezí skutečné deformace (skutečného přetvoření), což je stanoveno normou.



Obr. 2.14 - Aproximace podle Swift - Krupkowski

Základní vztah pro aproximaci podle Swift - Krupkowski:

$$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \quad [\text{MPa}] \quad (23)$$

kde:  $C$  - modul monotónního zpevnění [MPa]  
 $n$  - exponent deformačního zpevnění [-]  
 $\varphi_0$  - ofsetová deformace [-]  
 $\varphi$  - skutečná deformace [-]

Úkolem ofsetové deformace  $\varphi_0$  je posouvat křivku tak, aby její průsečík se svislou osou (osou napětí) byl roven mezi kluzu  $\sigma_k$ .

### 2.3.1.2 Anizotropie

Anizotropie mechanických a fyzikálních vlastností materiálu se projevuje rozdílným chováním tohoto materiálu v různých směrech souřadného systému. Anizotropie musí být brána v úvahu, protože reálná většina materiálů není homogenní. Tato nestejnorodost materiálu může být způsobena třeba díky různé velikosti zrn ve struktuře, nepravidelnému uspořádání vměstků atd. Anizotropie je dělena na normálovou (brána ve směru tloušťky plechu) a plošnou anizotropii (brána v rovině plechu).

#### Normálová anizotropie

Tato anizotropie je brána ve směru tloušťky plechu a určuje se u ní její střední hodnota, která se označuje  $r_s$ .

$$r_s = \frac{1}{4}(r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (24)$$

kde:

- $r_0$  - hodnota normálové anizotropie ve směru  $0^\circ$
- $r_{45}$  - hodnota normálové anizotropie ve směru  $45^\circ$
- $r_{90}$  - hodnota normálové anizotropie ve směru  $90^\circ$

Ke zjištění hodnot normálové anizotropie ve směru  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  ke směru válcování plechu je třeba uplatnit následující vztah (25), který je dán podílem skutečné deformace šířky plechu a skutečné deformace tloušťky plechu. Dolní index  $x$  v následujícím vztahu (25) znázorňuje v jakém směru (ve stupních) oproti směru válcování byl vzorek odebrán.

$$r_x = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{-\left(\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0}\right)} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{-\left(\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}\right)} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot b_0}{l \cdot b}} \quad [-] \quad (25)$$

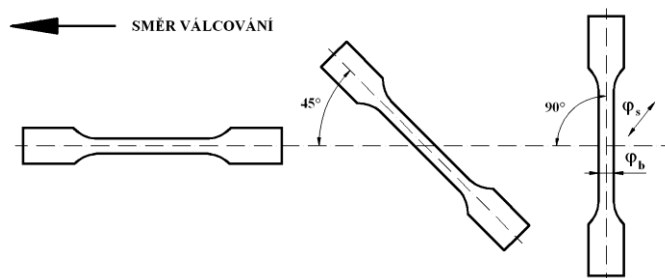
Jmenovatel ve vztahu (25) je upraven pomocí vztahů (26) a (27).

$$\varphi_1 + \varphi_b + \varphi_s = 0 \quad (26)$$

$$\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{s}{s_0} = 0 \Rightarrow \ln \frac{s}{s_0} = -\left(\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0}\right) \quad (27)$$

kde:

- $l$  - konečná měřená délka vzorku [mm]
- $l_0$  - počáteční měřená délka vzorku [mm]
- $b$  - konečná šířka vzorku [mm]
- $b_0$  - počáteční šířka vzorku [mm]
- $s$  - konečná tloušťka vzorku [mm]
- $s_0$  - počáteční tloušťka vzorku [mm]



**Obr. 2.15 - Orientace vzorků vůči směru válcování**

Pomocí normálové anizotropie lze zjistit jakou odolnost proti ztenčení má zkoumaný plech. Z experimentálních měření bylo zjištěno, že vzorky z oceli odebrané pod úhlem  $45^\circ$  ke směru válcování vykazují nejmenší hodnotu normálové anizotropie. Naopak vzorky, které byly odebrány kolmo na směr válcování, dosahují nejvyšších hodnot normálové anizotropie. Mezi hodnotami anizotropie pro jednotlivé směry tedy platí závislost  $r_{90} > r_0 > r_{45}$ .

Pro praktické využití z hlediska hlubokotažnosti je vhodné, když střední hodnota normálové anizotropie  $r_s$  bude co nejvyšší. U hlubokotažných materiálů je potřeba, aby ke změnám tloušťky docházelo co nejméně, proto bude hodnota  $r_s > 1$ . Oproti tomu materiál, který bude mít hodnotu  $r_s < 1$ , tak se k hlubokému tažení nehodí, protože ke ztenčení materiálu ve směru tloušťky dochází velmi rychle.

### Plošná anizotropie

Plošná anizotropie je brána v rovině plechu a určuje se u ní hodnota, která se označuje  $\Delta r$ .

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (28)$$

Jak je zřejmé ze vzorce, tak ke zjištění hodnoty  $\Delta r$  je opět zapotřebí zjistit hodnoty normálové anizotropie v potřebných směrech.

Plošná anizotropie ovlivňuje hluboké tažení, protože má za následek cípatost výtažků. Pro tváření je pak vhodné, když  $\Delta r$  bude mít co nejmenší hodnotu. Praktickým zkoušením bylo dokázáno, že pokud koeficient plošné anizotropie  $\Delta r > 0$ , tak cípy vznikají ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  na směr válcování. Pokud bude  $\Delta r < 0$ , tak se cípy vytvářejí ve směru  $45^\circ$  ke směru válcování materiálu. Naopak když bude  $\Delta r = 0$ , tak k cípatosti nedojde. Hodnoty koeficientu plošné anizotropie mohou tedy nabývat jak kladných, tak i záporných čísel.

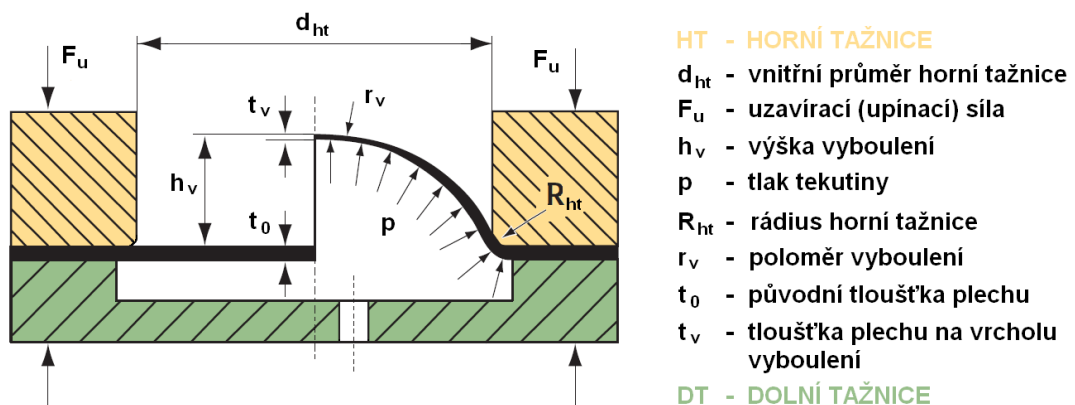


### 2.3.2 Technologické zkoušky [15, 18, 19, 20]

Technologické zkoušky jsou používány k simulování nebo k napodobování chování materiálu při jednoduchých tvářecích procesech.

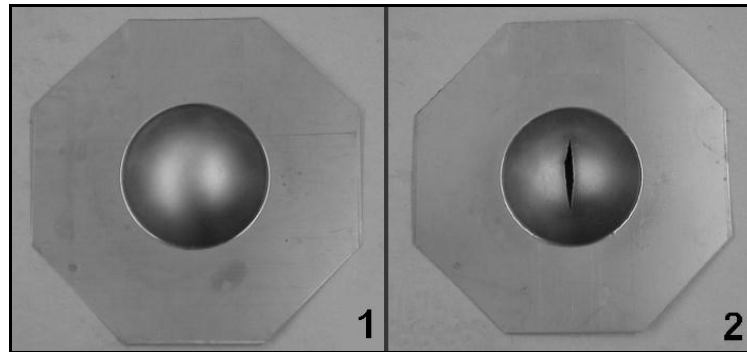
#### 2.3.2.1 Hydraulická zkouška vyboulváním (BULGE TEST)

Hydraulická zkouška vyboulváním plechu je jednou z možností jak získat potřebné vlastnosti materiálu při dvouosém namáhání. Tato zkouška se převážně provádí při pokojové teplotě a dosahuje se při ní vyšších hodnot napětí oproti tahové zkoušce. Princip této hydraulické zkoušky je založen na vyboulvání plechu pomocí tlaku tekutiny (oleje). Zkoušený vzorek je upnut mezi horní a dolní tažnicí. Upínací síla mezi horní a dolní tažnicí musí být dostatečně velká na to, aby zabránila vyklouznutí plechu ze sevření tažnic. V prostoru pod upnutým plechem se stlačuje tekutina, působí zespodu na vzorek a vybouluje ho do prostoru horní tažnice. S rostoucím tlakem tekutiny se zvětšuje i vyboulení zkoušeného plechu. Když deformace materiálu přesáhne určitou mez, dojde k porušení plechu. Jak je již zmíněno v úvodu odstavce, tento test se provádí převážně při pokojové teplotě (25 °C). Tato teplota stačí pro zkoušení dobře tvářitelných materiálů (např. hliníkové slitiny). Ovšem pro obtížněji tvářitelné materiály (např. hořčikové slitiny) se pracuje s vyššími teplotami v rozsahu od 150 °C do 300 °C. Princip této zkoušky s vysvětlivkami je znázorněn na obrázku 2.16.



Obr. 2.16 - Princip hydraulické zkoušky vyboulváním (Bulge testu)

Hydraulickou zkoušku vyboulváním plechu lze uplatnit při kontrole kvality příchozího materiálu ve výrobních závodech. Podle výšky vyboulení a podle toho jestli vznikla nebo nevznikla prasklina, lze stanovit tvařitelnost materiálu. Na následujícím obrázku (obr. 2.17) jsou vzorky dvou plechů z rozdílných slitin. Oba vzorky mají stejnou výšku vyboulení, ovšem k porušení došlo jen u druhého vzorku. Proto první vzorek má lepší tvařitelnost než vzorek číslo 2.

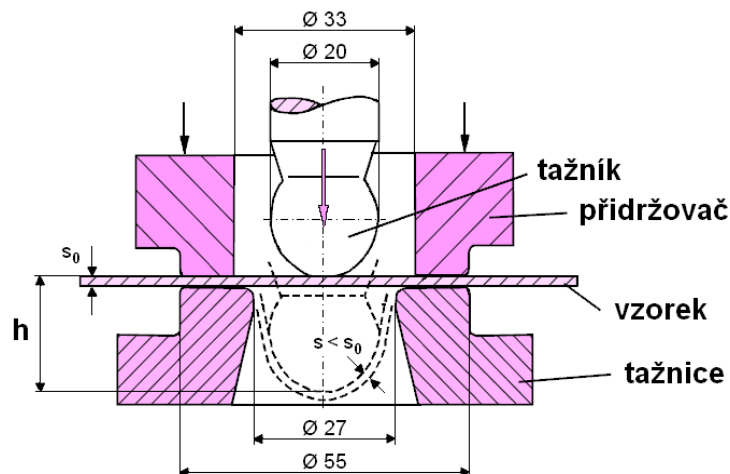


Obr. 2.17 - Vzorky po provedení Bulge testu

### 2.3.2.2 Zkouška hloubením podle Erichsena

Tato zkouška hloubením (v Evropě známá jako Erichsenova, v USA jako Olsenova) se používá k napodobování chování materiálu při dvouosém tahu. Při zkoušce hloubením je zkoušený vzorek plechu upnut mezi přidržovačem a tažnicí a poté je pomocí tvrzeného kulovitého nástroje (tažníku) prohlouben. Tento test probíhá při stanovené rychlosti, než se vytvoří jemná nepřerušovaná trhlinka. Jako ukazatel tvařitelnosti je brána velikost prohloubení  $h$  v okamžiku vytvoření praskliny. Velikost prohloubení se označuje jako ukazatel  $IE$  (index dle Erichsena) a představuje důležitý atribut kvality plechu.

Na následujícím obrázku je ukázán princip tohoto testu s popisem jednotlivých částí. Obrázek je také doplněn o rozměry, které se u této zkoušky standardně používají.



Obr. 2.18 - Ukázka podstaty zkoušky hloubením dle Erichsena

Jedná se o rychlou, jednoduchou a levnou zkušební metodu, kterou lze využívat ke kontrole vstupního materiálu nebo pro namátkovou kontrolu materiálu během výrobního cyklu. Nevýhodou této metody je menší citlivost jejích výsledků na tvařitelnost jednotlivých jakostí plechu.



Obr. 2.19 - Detail porušení vzorku po vykonané zkoušce hloubením

### 2.3.2.3 Zkouška kalíšková podle Swifta

Další zkouškou, která je určující z hlediska tvařitelnosti plechů, je kalíšková zkušební metoda (známá také jako Swiftova). Tento test je využíván k simulování procesu hlubokého tažení pro tenké plechy.

Princip tohoto testu je založen na vytažení kruhových přístřihů z plechu do tvaru kalíšků (kelímků) pomocí hladkého tažníku o průměru  $d$ . Ke zkoušce lze využít několika kruhových přístřihů, jejichž rozměr  $D_0$  se postupně zvětšuje. Maximální hodnota průměru kruhového přístřihu, ze kterého lze ještě vytáhnout kalíšek bez porušení a hodnota průměru tažníku se používají k tvorbě limitního poměru.

Tento limitní poměr je označován jako koeficient tažení  $K$ .

$$K = \frac{D_{0 \text{ MAX}}}{d} \quad [-] \quad (29)$$

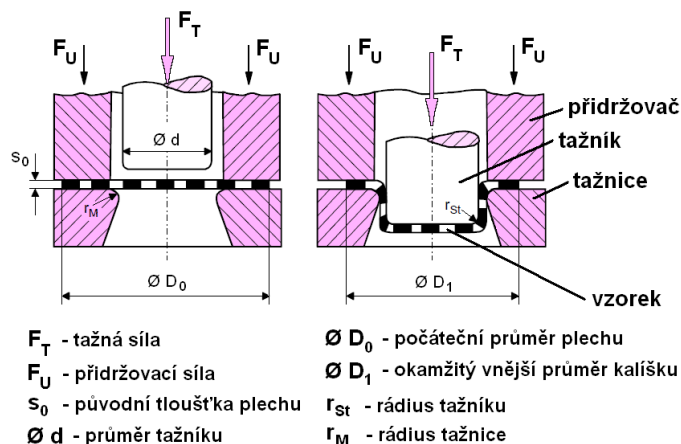
Obrácená hodnota tohoto poměru je nazývána jako stupeň tažení  $M$ .

$$M = \frac{d}{D_{0 \text{ MAX}}} \quad [-] \quad (30)$$

Koeficient tažení nebo stupeň tažení jsou ukazateli tvařitelnosti plechu.

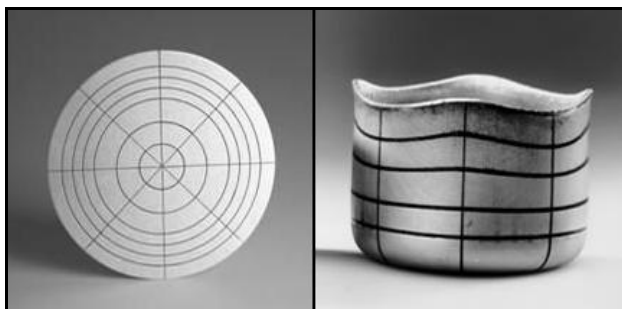
Této zkušební metody je využito především u rotačních symetrických součástí. Podmínky kalíškové zkoušky se víceméně shodují s tažením v praxi.

Na následujícím snímku (obr. 2.20) je uveden princip tohoto testu. Obrázek je doplněn o popisky jednotlivých částí a také o vysvětlivky.



**Obr. 2.20 - Ukázka podstaty kalíškové zkoušky dle Swifta**

K pozitivům kalíškové metody patří možnost vyhodnocení anizotropie mechanických vlastností zkoušeného plechu, díky cípatosti výtažků. Cípy kalíšku jsou měřeny od dna kelímku. Vzdálenost mezi dnem kalíšku a vrcholem cípu (nejvyšší místo lemu) se označuje jako rozměr  $h_{max}$ . Naopak vzdálenost k prohlubni cípu (nejnižší místo lemu) je stanovena zase jako rozměr  $h_{min}$ . Cípatost je znázorněna na následujícím obrázku.



**Obr. 2.21 - Kalíšková zkouška (obr. vlevo: vzorek před zkouškou, obr. vpravo: vzorek po zkoušce)**

#### 2.3.2.4 Zkouška tažením v kuželové tažnici

Zkouška tažením v kuželové tažnici je technologická zkušební metoda, která testuje zkoušený vzorek z hlediska smíšeného namáhání. Smíšené zatížení je u tohoto testu složeno z hlubokého tažení v oblasti tažníku a z vypínání na obvodu tělíska.

Tato zkouška je založena na tažení kruhového přístřihu, jenž může mít uprostřed i otvor, pomocí plochého, kulovitého, eliptického nebo parabolického tažníku do tažnice, která má tvar kuželu. Tloušťka zkoušeného plechu není u tohoto testu bezvýznamná. Na tloušťce vzorku totiž závisí jak průměr použitého tažníku, tak i průměr kruhového přístřihu zkušebního

plechu. Pro informaci je uvedeno, že průměr tažníku se pohybuje od 12,7 mm pro tloušťku plechu 0,5 až 0,8 mm, do 26,99 mm pro tloušťku 1,2 až 1,6 mm. Průměr kruhového přístřihu se řídí podle vztahu:

$$D_0 = (50 \div 70) \cdot t_0 \quad [\text{mm}] \quad (31)$$

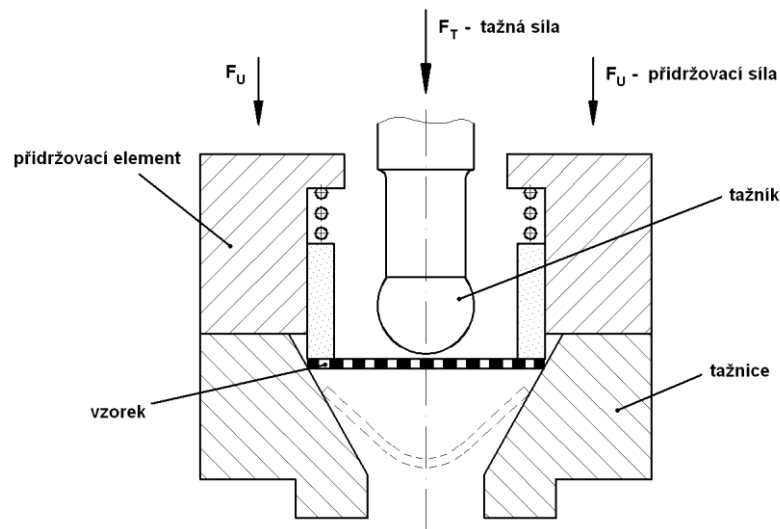
kde:  $t_0$  - tloušťka zkušebního plechu [mm]

Ukazatelem tvařitelnosti je údaj, který se označuje  $J$  a je dán vztahem:

$$J = \frac{D_1}{D_0} \quad [-] \quad (32)$$

kde:  $D_1$  - průměr obvodu výtažku v momentě vytvoření praskliny [mm]

Schéma zkoušky je vyobrazeno na následujícím obrázku.



**Obr. 2.22 - Metoda tažením v kuželové tažnici**

Výhodou metody tažením v kuželové tažnici, například oproti zkoušce hloubením dle Erichsena, je lepší citlivost výsledků na tvařitelnost při porovnání jednotlivých jakostí materiálů. Mezi negativa tohoto testu lze zařadit poměrně složitou uskutečnitelnost zkoušky. Proto se více využívá při laboratorním výzkumu, než v běžné praxi.



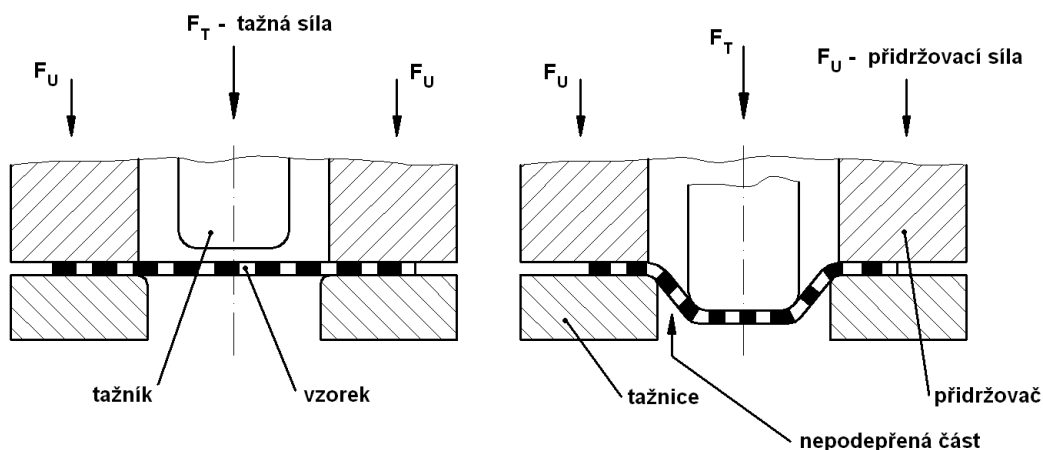
Obr. 2.23 - Detail porušení vzorku po vykonané zkoušce tažením v kuželové tažnici

### 2.3.2.5 Zkouška zvlnění

Zkouška zvlnění je příbuzná ke zkoušce kalíškové podle Swifta. Ovšem hlavní odlišností mezi těmito metodami je, že u testu zvlnění se záměrně nechává větší mezera mezi tažníkem a tažnicí. Je uváděno, že tažník má přibližně 75 % průměru tažnice.

Jak již vyplývá z názvu, tato zkušební metoda je spjatá se vznikem vln. Místa, kde vznikají vlny, jsou závislá na velikosti přidržovací síly. Při malých přidržovacích silách vznikají vlny na přírubě výtažku. Při větších hodnotách přidržovací síly se vlny tvoří zase ve stěnách výtažku.

Nákres metody zvlnění je na následujícím snímku.



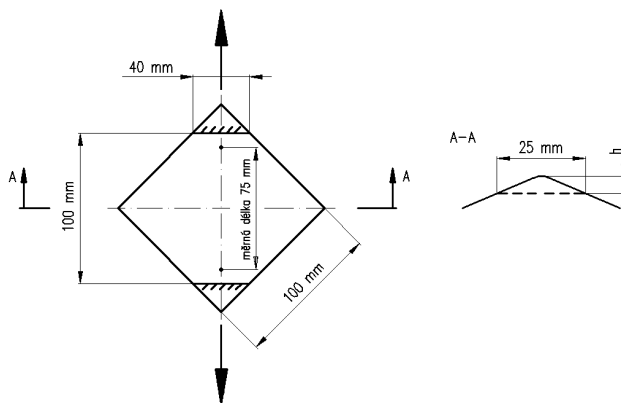
Obr. 2.24 - Zkouška zvlnění

### 2.3.2.6 Zkouška vyboulení

Technologický zkušební test vyboulení (neboli také Yoshida Buckling test) je zkouška, která se používá ke zhodnocení náchylnosti plechů k vyboulení (vrásnění).

Zkoušeným vzorkem je plech ve tvaru čtverce, který je v opačných rozích sevřen čelistmi a je natahován. Díky tahovému zatížení se poté v oblasti úhlopříčky vytvářejí vyboulení (vrásky). Výška vyboulení je pak měřena v ose vzorku.

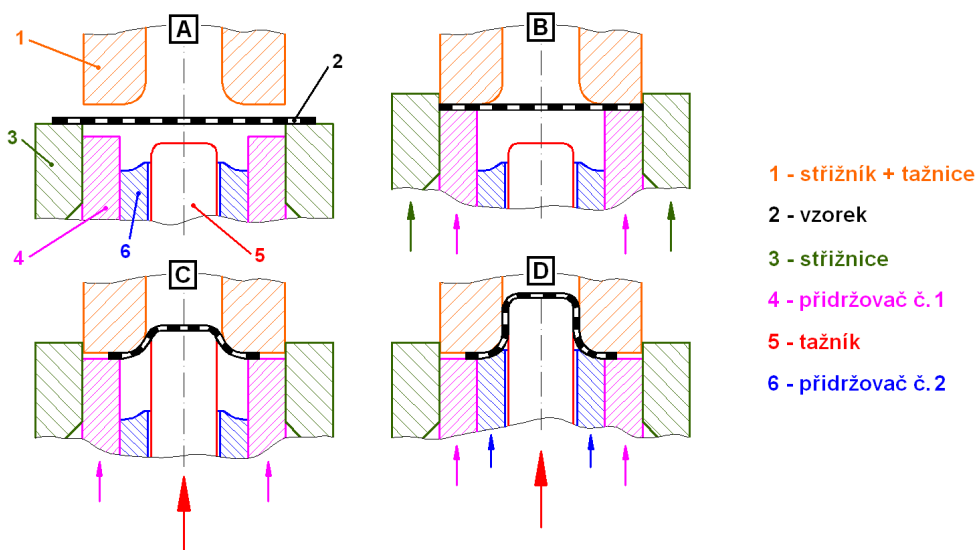
Na následujícím snímku je ukázán princip zkoušky vyboulení s rozměry vzorku.



Obr. 2.25 - Zkouška vyboulení (Yoshida Buckling test)

### 2.3.2.7 Zkouška kombinovaná podle Gross-Engelhardta

Kombinovaná zkušební metoda dle Gross-Engelhardta je založena na hlubokém tažení zkoušeného plechu a jeho následujícím vypínání, kdy je vzorek sevřen mezi přidržovačem a tažnicí. Zkouška je ukončena až po porušení měřeného vzorku. Princip a jednotlivé etapy této zkoušky jsou znázorněny na následujícím schématu.



Obr. 2.26 - Etapy kombinované zkoušky dle Gross-Engelhardta  
(A - před zkouškou, B - stříhání a přidržení plechu, C - tažení, D - sevření příruby a tažení)

Při vyhodnocování se zjišťuje tzv. přirozený stupeň hlobokotažnosti  $T$ , který je ukazatelem tvařitelnosti plechu.

Tento ukazatel je dán vztahem:

$$T = \frac{(F_P - F_T)}{F_P} [-] \quad (33)$$

kde:

$F_T$  - tažná síla [N]

$F_P$  - maximální tažná síla, při které je vzorek sevřen druhým přidržovačem a při které dojde k utržení dna výtažku [N]



Obr. 2.27 - Porušené vzorky z kombinované zkoušky dle Gross-Engelhardta

#### 2.3.2.8 Zkouška rozšiřováním otvoru dle Siebela a Pompa

Při zkoušce rozšiřováním otvoru je zkoušený přístřih plechu, který je opatřen centrálním otvorem, vytahován pomocí válcového tažníku. Při tažení se předstřížený otvor rozšiřuje a při vzniku první trhlinky na okraji rozšířeného otvoru zkouška končí.

Při vytvoření první radiální trhlinky na okraji otvoru, což je bráno jako limitní stav, se vyhodnocuje hloubka tahu  $z$  a poměrné rozšíření otvoru  $d'$ , které je dáno vztahem:

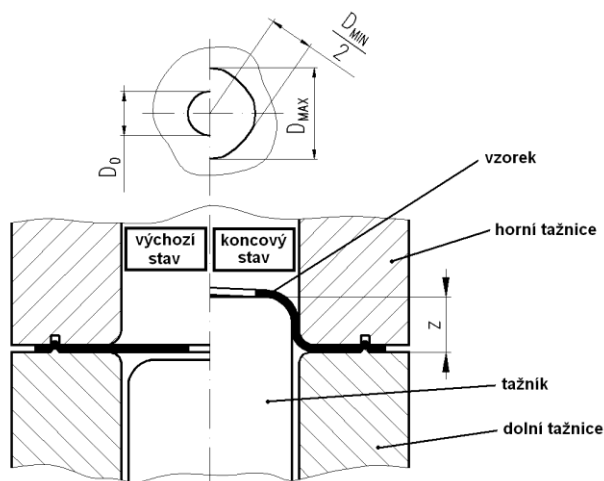
$$d' = 0,5 \cdot (D_{\text{MAX}} + D_{\text{MIN}}) \text{ [mm]} \quad (34)$$

Ukazatelem vhodnosti plechu k hlubokému tažení je veličina  $q$ , která se stanoví podle vztahu:

$$q = \frac{z \cdot (D_{\text{MAX}} + D_{\text{MIN}})^2}{4 \cdot D_0 \cdot (D_{\text{MAX}} - D_{\text{MIN}})} \text{ [mm]} \quad (35)$$

Po ukončení zkoušky není rozšířený otvor zcela kruhový, což je důsledek anizotropie. Tento jev je patrný na následujícím obrázku, na kterém je také vidět princip této zkušební metody.





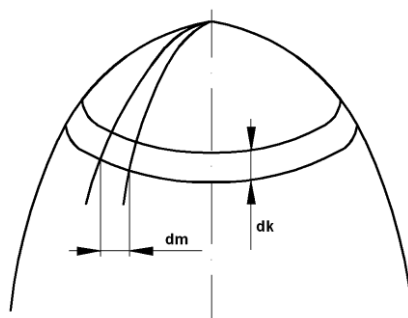
Obr. 2.28 - Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

## 2.4 Úvod do membránové analogie

Rotačně symetrické skořepiny v membránovém stavu jsou v technické praxi hojně využívány. V rámci této diplomové práce byla teorie membrán použita při vyhodnocování hydraulické zkoušky vyboulováním (Bulge testu). Při vyhodnocení Bulge testu byla použita Laplaceova rovnice, která je v této kapitole také odvozena.

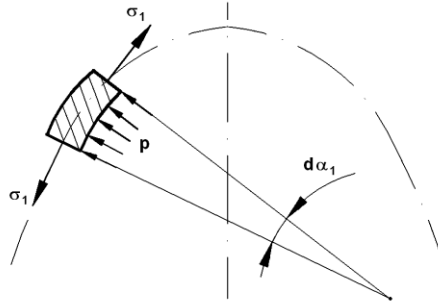
### 2.4.1 Napjatost rotačně symetrické membrány [21, 22, 23]

Pro určení napjatosti rotačně symetrické membrány je potřeba z této membrány vyjmout nekonečně malý dílek. Na následujícím schématu je tento malý dílek zobrazen jako element mezi dvěma nekonečně blízkými meridiány a mezi dvěma nekonečně blízkými rovnoběžkami.



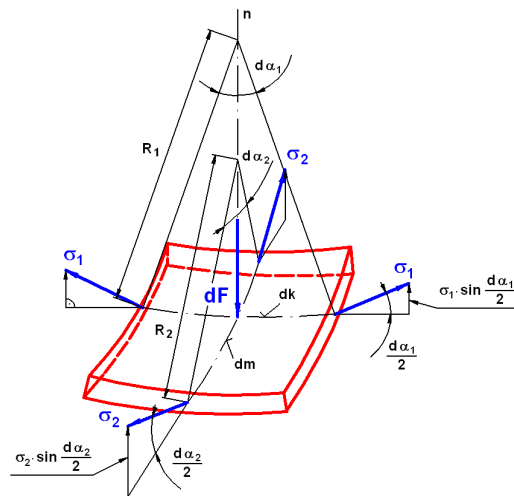
Obr. 2.29 - Vyjmutý element membrány

Z dalšího obrázku je patrné, že vyňatý dílek je namáhán tlakovým zatížením  $p$ . Na element mají vliv také napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ , které ho udržují v rovnováze. Napětí  $\sigma_1$  působí ve směru meridiánu a napětí  $\sigma_2$  zase ve směru rovnoběžky (nejsou na schématu patrna).



**Obr. 2.30 - Vyňatý element ohraničen řezy procházejícími normálou**

Pro sestavení Laplaceovy rovnice je nutno složit rovnici rovnováhy se všemi silovými účinky, které působí na vyjmutý dílek. Pro sestavení rovnice rovnováhy se počítá se složkami silových účinků do směru normály  $n$ . Pro názornost a snadnější odvození rovnice rovnováhy je tento element znázorněn na následujícím obrázku. Silové účinky, jako síla  $dF$  (což je výslednice tlaku, který působí po ploše dílku) a síly vyvolané napětími  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ , které působí ve stěnách elementu, jsou znázorněny modrou barvou. Červenou barvou je zobrazen vyňatý dílek.



**Obr. 2.31 - Vyjmutý dílek membrány se znázorněnými silovými účinky**

Základní rovnice rovnováhy bude mít tedy tvar:

$$2 \cdot \sigma_1 \cdot \sin \frac{d\alpha_1}{2} \cdot dm \cdot s + 2 \cdot \sigma_2 \cdot \sin \frac{d\alpha_2}{2} \cdot dk \cdot s - dF = 0 \quad (36)$$

Pro malé úhly  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  platí:

$$\sin \frac{d\alpha_1}{2} \approx \frac{d\alpha_1}{2} \quad \text{a} \quad \sin \frac{d\alpha_2}{2} \approx \frac{d\alpha_2}{2} \quad (37), (38)$$

a dále platí:

$$dm = R_2 \cdot d\alpha_2 \quad \text{a} \quad dk = R_1 \cdot d\alpha_1 \quad (39), (40)$$

$$dF = p \cdot dm \cdot dk = p \cdot R_2 \cdot d\alpha_2 \cdot R_1 \cdot d\alpha_1 \quad (41)$$

Po dosazeních a úpravách do základní rovnice rovnováhy se dostane rovnice, která se nazývá Laplaceova rovnice. Laplaceova rovnice má tvar:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{s} \quad (42)$$

kde:

$\sigma_1, \sigma_2$	-	napětí působící ve stěnách elementu [MPa]
$R_1, R_2$	-	poloměry zakřivení elementu [mm]
$p$	-	tlak působící po ploše elementu [MPa]
$s$	-	okamžitá tloušťka elementu [mm]

## 2.5 Fotogrammetrie [24]

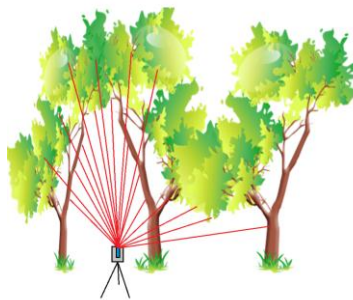
Je vědní obor zabývající se zpracováváním informací z fotografických snímků, které je možno opatřit buď ze stanoviště umístěného ve vzduchu, nebo ze stanoviště nacházejícího se na Zemi. Pomocí této vědní disciplíny lze určovat například rozměry, tvary nebo polohy objektů, jenž jsou zobrazeny na pořízených fotografiích. Fotogrammetrie má velice široké využití, protože tuto metodu lze uplatnit všude tam, kde lze zkoumaný objekt vyfotografovat a posléze vyhodnotit. Používá se například v kartografii (využití leteckých snímků), ve strojírenství (zjišťování deformací, stavů napjatosti a dimenzování součástí), v architektuře (rekonstrukce zničených budov), v meteorologii (snímky z družic), v archeologii atd.

### 2.5.1 Rozdělení fotogrammetrie [24]

**Podle místa umístění stanoviště:**

Pozemní fotogrammetrie (terestrická)

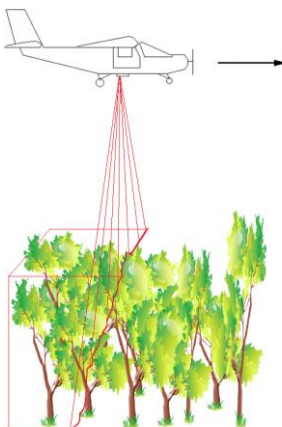
- stanoviště snímání je na pevném bodě na Zemi
- výhodou je nenáročnost na technické a fotografické vybavení
- mezi nevýhody patří zakryté oblasti při snímání, které pak nelze vyhodnotit
- používá se spíše pro výškově členité objekty (budovy, skalnatý terén)



**Obr. 2.32 - Pozemní fotogrammetrie**

### Letecká fotogrammetrie (satelitní)

- stanoviště je umístěné v určité výšce nad Zemí a pohybuje se (v letadle)
- k výhodám lze zařadit větší zobrazení plochy
- nevýhodou je obtížnější zpracování
- využívá se při tvorbě map nebo při dokumentaci špatně přístupných míst



**Obr. 2.33 - Letecká fotogrammetrie**

### **Podle počtu pořízených snímků:**

#### Jednosnímková fotogrammetrie

- při jednosnímkové metodě lze určit jen rovinné souřadnice objektu
- používá se pro snímání téměř rovinných objektů (fasády budov)

#### Dvou a vícesnímková fotogrammetrie

- u této metody lze vyhodnotit prostorové souřadnice předmětu
- snímání objektu musí být na obou fotografiích současně
- lze například uplatnit při leteckém snímání z nízkých výšek

**Podle metody zpracování snímků:** (převod snímkových souřadnic na 2D nebo 3D souřadnice)

#### Metoda analogová

- pro vyhodnocení se využívají složitá opticko-mechanická zařízení
- obsluha přístrojů je složitá
- tato metoda je dnes již zastaralá

#### Metoda analytická

- vyhodnocení se řeší pomocí počítačů
- snímky by měly mít dostatečný překryt a zhruba rovnoběžné osy záběru

#### Metoda digitální

- lze pracovat s digitálním obrazem (snímek pořízený digitálním fotoaparátem)
- souřadnice snímku jsou měřeny přímo na obrazovce
- k získání 3D vjemu obrazu je potřeba speciální hardware (např. speciální brýle)

### **2.5.2 Fotogrammetrie ve strojírenství [15, 25, 26, 27, 28]**

Principy fotogrammetrie mají velmi široké využití a pronikly i do strojírenství, kde se pomocí optických metod měření zrychluje, zjednodušuje a zkvalitňuje například výroba prototypů, příprava výroby a nebo kontrola. Optických systémů lze ve strojírenství využívat ke zjišťování kinematických i rozměrových veličin. Pomocí kinematických veličin lze poté odvodit stavy napjatosti, deformační chování materiálu nebo zjistit pohybové charakteristiky. Měření rozměrů zase poslouží pro převedení předmětů do digitální podoby a tvorbu modelů. Pro neustále rostoucí nároky je důležité, aby optická digitalizace splňovala určité základní požadavky jako je rychlost, přesnost měření, nenáročnost na obsluhu, snadná přemístitelnost nebo záznam ve vysokém rozlišení. Tyto požadavky velice dobře splňuje německá firma GOM mbH, která se zabývá vývojem optické měřicí techniky. Mezi nejznámější a nejpoužívanější produkty této firmy patří bezkontaktní optické měřicí systémy ARAMIS, ARGUS a PONTOS, jenž se užívají k deformačním nebo pohybovým analýzám. Dalším významným počinem této německé společnosti je také systém ATOS, který se používá pro 3D skenování ploch a dokáže vygenerovat velmi přesná plošná data.

### 2.5.2.1 Systém ARAMIS

Aramis je optický bezkontaktní systém, který se využívá ke zjišťování 3D deformací. Tento systém nám pomáhá k lepšímu pochopení chování materiálu, užívá se při dimenzování součástek, při výpočtech stability, při optimalizacích procesu tváření, dále je vhodný i pro měření s vyšším rozlišením detailů, pro měření lokálních deformací s vysokou přesností nebo k měření rychlých dynamických dějů (rázové zkoušky). Kromě dynamických dějů poskytuje systém Aramis také možnost měření objektů zatížených staticky. Ke snímání statických i dynamických dějů je využito dvou digitálních CCD kamer, které nám dávají prostorový obraz. CCD (Charge-Coupled Device, což v překladu znamená zařízení s vázanými náboji) je polovodičový prvek používající se pro zaznamenání obrazové informace. Tento prvek má fotocitlivou plošku, která je rozdělená na bodový rastr. Na rastr poté dopadá světlo a on je schopen měřit jeho intenzitu. Při snímání dějů je zapotřebí mít dostatečně osvětlenou scénu. O osvětlení se starají dvě polarizovaná světla. Uprostřed mezi kamerami se nachází také laserový hledáček, který nám napomáhá při kalibraci systému. Obě kamery musí pracovat synchronně. O synchronizaci se stará trigger box. Podle potřeby je také možno systém kamer upevnit na stativ, jak je vyobrazeno na následujícím snímku.

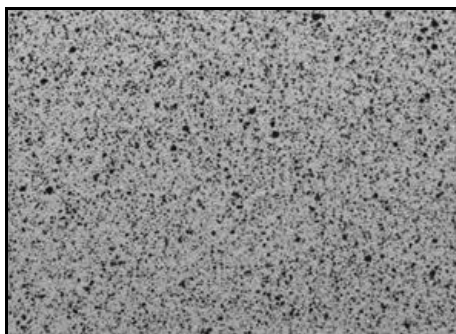


**Obr. 2.34 - Konfigurace bezkontaktního optického měřicího systému Aramis**

#### Proces měření

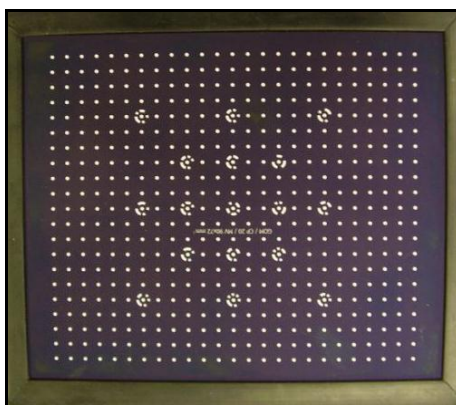
Ještě než začne samotné snímání, je třeba na povrchu zkušební součásti nebo vzorku vytvořit specifickou deformační síť, tzv. pattern. Postup tvorby patternu se skládá z několika kroků. Nejprve je zapotřebí zkušební vzorek zbavit nečistot odmaštěním. To se provádí vhodným prostředkem (např. technický aceton). V další fázi se na odmaštěný vzorek nastříkne vrstvička

bílé barvy. V posledním kroku se na bílý vzorek nanese poprašek černé barvy. Vznikne tak zmiňovaná specifická deformační síť, která je tvořena dvěma kontrastními barvami - černou a bílou, které jsou nahodile (stochasticky) uspořádány. Při tvorbě patternu je snaha zamezit tvorbě příliš velkých černých kaněk, nebo naopak příliš velkých bílých míst. Vyhovující vzhled patternu je na následujícím obrázku.



**Obr. 2.35 - Specifická deformační síť (tzv. pattern) pro snímání systémem Aramis**

Když je na zkušební vzorku nanesen pattern, přichází na řadu kalibrace systému, pomocí které si kamery určí tzv. kalibrační objem, což je prostor, ve kterém budou kamery pracovat. Kalibrace se provádí pomocí kalibrační destičky, která obsahuje kalibrační body. Detail kalibrační destičky je znázorněn na obrázku 2.36. Vlastní kalibrace poté spočívá v posuvu, v natáčení a v naklánění kalibrační destičky podle instrukcí měřicího softwaru v prostoru před kamerami. Po dokončení kalibrace dojde k vymezení již zmíněného kalibračního objemu. Tento prostor je důležitý pro výpočet, protože každý bod, který je umístěn mimo kalibrační objem, se při výpočtu eliminuje.

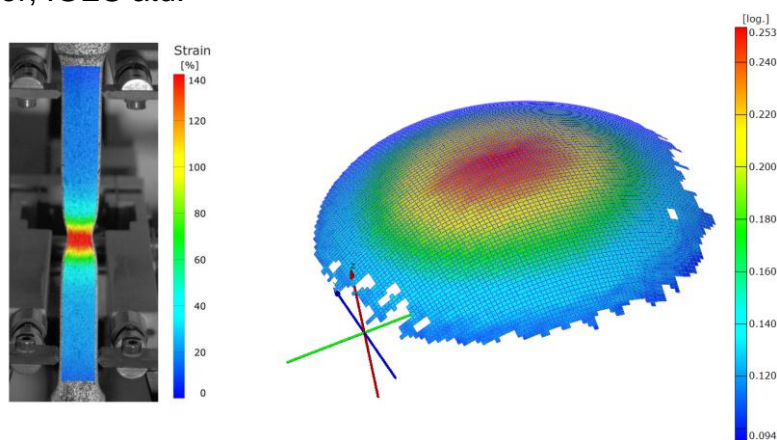


**Obr. 2.36 - Kalibrační destička**

Po těchto přípravných operacích lze již zatěžovat zkušební součást a provádět snímání. Při zatížení se deformuje nejen součást, ale i pattern nanesený na jejím povrchu. Kamery tento děj snímají v určité nastavené

frekvenci a jednotlivé snímky zálohují do počítače. Software poté rozdělí deformační síť na jednotlivé body (fazety) a ze změny polohy těchto bodů v průběhu zatěžování se provede analýza deformace.

Výsledky snímání lze potom různě upravovat, lze například postup zatěžování zobrazit jako přehlednou grafickou závislost nebo jako animaci, dále lze také výsledky znázornit jako barevnou mapu deformovaného povrchu (obrázek 2.37) atd. Výstupními daty z měření mohou dále být např. hodnoty hlavních a vedlejších deformací, hodnoty změn tloušťky snímaných objektů, hodnoty prostorového posunutí bodů na povrchu součásti nebo porovnání velikosti deformace s limitní tvářecí křivkou (FLC). Software Aramis umí transformovat zaznamenaná data do modelu CAD nebo STL, dále též dokáže importovat CAD i STL data z programů CATIA, Pro/Engineer, IGES atd.



Obr. 2.37 - Ukázky znázornění deformací pomocí barevné mapy

### Základní typy měřicího systému Aramis

Základní typy systému Aramis se od sebe odlišují především rozlišením použitých kamer a snímkovací frekvencí. Jednotlivé typy tohoto měřicího systému se základními technickými údaji jsou pro názornost uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2.4 - Základní typy systému Aramis

	ARAMIS 2M	ARAMIS 4M	ARAMIS 5M
Rozlišení kamer [px]	1624 x 1236	2352 x 1728	2448 x 2050
Snímkovací frekvence [Hz] *	15 (29)	60 (480)	15 (29)
Rozsah měření deformace [%]	od 0,01 až do 100 a více		
Přesnost měření deformace [%]	do 0,01		
	ARAMIS 12M	ARAMIS HS	
Rozlišení kamer [px]	4096 x 3072	1280 x 1024	
Snímkovací frekvence [Hz] *	24 (367)	500 (4000)	
Rozsah měření deformace [%]	od 0,01 až do 100 a více		
Přesnost měření deformace [%]	do 0,01		
* u snímkovací frekvence hodnota před závorkou udává frekvenci při plném rozlišení a hodnota v závorce udává frekvenci při sníženém rozlišení CCD čipu			



### 2.5.2.2 Systém PONTOS

Stejně jako předchozí systém Aramis se i tento systém řadí mezi mobilní bezkontaktní optické měřicí systémy. Systém Pontos je vhodný k měření vibrací, deformací, tuhosti těles nebo k dynamickému snímání pohybů (lze zjistit hodnoty kinematických veličin jako posuv, rychlost a zrychlení). Mezi výhody tohoto systému patří možnost prakticky neomezeně snímat velké množství diskrétních měřících bodů, což je právě z hlediska dynamiky velice vhodné. Další kladnou vlastností je menší náročnost na měření oproti obyčejným metodám měření vibrací nebo dynamiky pohybu, protože při snímání nejsou použity žádné konvenční senzory, od kterých by musely vést kabely a celé by se to muselo složitě kalibrovat. Proto lze Pontos aplikovat i v aerodynamických tunelech. Již zmíněné měřící body se umísťují na povrch zkoumaného tělesa a poskytují náhradu deformační sítě, kterou využívají Aramis a Argus (viz. kapitola 2.5.2.3). Měřící body se na snímané těleso přichycují magnetem nebo samolepkou a pomocí dvou kamer se při měření zaznamenává pohyb těchto sledovaných bodů.

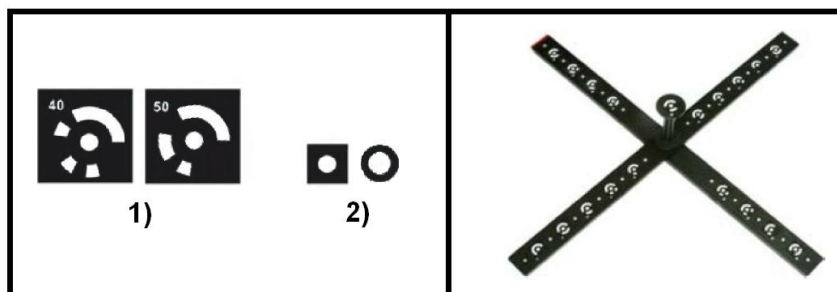


Obr. 2.38 - Konfigurace systému Pontos a detailní záběr kamer

#### Proces měření

Před vlastním procesem snímání se na zkoumané těleso musí umístit potřebné množství reflexních měřících bodů. Dobrá reflexe bodů zajišťuje lepší viditelnost i při vysokých frekvencích snímání. Podle identifikace lze rozdělit měřící body na dva typy: kódované a nekódované body (viz. obrázek 2.39). Další důležitou přípravnou činností je stanovení příslušné vzdálenosti kamer od měřeného objektu a volba vhodné délky tyče, která se používá k pevnému spojení kamer (obvykle jsou dodávány tři různě dlouhé tyče). Tyto aspekty záleží na velikosti objemu měřeného tělesa. Dále je potřeba nastavit správný úhel natočení kamer. Toho se docílí pomocí tří laserových paprsků (jeden paprsek na každé kameře a jeden uprostřed tyče), které se musí setkat v jednom bodě. Posledním přípravným krokem je zaostření

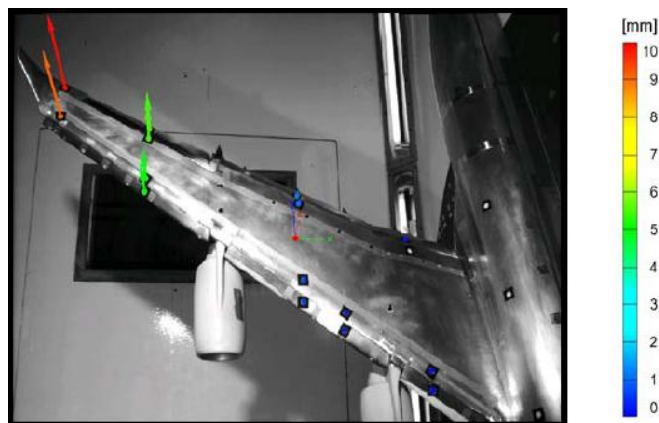
kamer, nastavení clon a kalibrace kamer. Ke kalibraci slouží kalibrační kříž, který se skládá ze dvou pevně smontovaných desek, na kterých je umístěn určitý počet kódovaných bodů v přesně stanovené geometrické pozici (obrázek 2.39). Tento kříž se pak snímá v definovaných polohách a provede se kalibrace.



**Obr. 2.39 - Kalibrace systému (vlevo: 1-kódované body, 2-nekódované body, vpravo: kalibrační kříž)**

Po dokončení přípravných činností lze již provést vlastní snímání měřeného objektu. Systém poté na základě optické triangulace spočítá prostorové souřadnice, posunutí a deformace jednotlivých bodů. Triangulace je metoda určení polohy souřadnic nebo délek pomocí trigonometrického výpočtu.

Výsledky snímání lze pak samozřejmě graficky zobrazit a z celého měření udělat přehledný protokolový záznam.



**Obr. 2.40 - Příklad jedné z možných aplikací systému Pontos (zjištění deformace křídla v aerodynamickém tunelu)**

### 2.5.2.3 Systém ARGUS

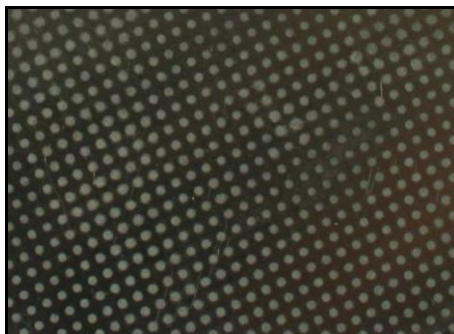
Optický měřicí systém Argus je jednou z dalších možností přesného bezdotykového snímání 3D deformací plechů při tvářecích procesech. Tento optický snímací systém má podobné využití jako systém Aramis, lze např. nejenom optimalizovat tvářecí nástroje, ale i ověřovat a hledat tu nejlepší variantu celého procesu tváření. Dále systém Argus umí na snímaném vzorku odhalovat místa s kritickou deformací nebo zjišťovat vlastnosti materiálu. Pro zkoumání těchto zmíněných záležitostí a provádění dalších analýz je systém Argus vybaven pouze jednou digitální kamerou s CCD snímačem, což je jeden z hlavních rozdílů oproti systému Aramis. Obrázek ve 3D je pak pořízen pomocí skládání snímků, které zachycují sledované těleso z různých míst, zatímco u Aramisu je poloha snímání neměnná. Další odlišností od Aramisu je schopnost systému Argus rozeznat stav výlisku před a po lisování, proto není potřeba snímat průběh změn nepřetržitě. Snímací kamera může být opět opatřena stativem. Ke zpracování, výpočtu dat a k vyhotovení analýz slouží výpočetní jednotka. Pro pevné uchopení snímaného předmětu, nebo pro jeho snazší manipulaci lze použít i pomocného zařízení.



Obr. 2.41 - Systém Argus + příslušenství (1 - Argus 5M, 2 - Argus 12M, 3 - transportní kufr)

### Proces měření

V první fázi měření, ještě před tvářením a vlastním snímáním, je třeba na povrchu zkušební součásti vytvořit deformační síť, která má na rozdíl od stochastické sítě Aramisu pravidelné uspořádání. Liší se i způsob tvorby deformační sítě. Deformační síť pro Argus se vytváří elektrochemickým vyleptáním rovnoměrné spleti bodů o velmi tenké tloušťce. Podle velikosti snímaného tělesa se vzdálenost mezi jednotlivými body sítě pohybuje v rozsahu mezi 1 mm až 6 mm. Pro kvalitní vytvoření deformační sítě je opět potřeba vzorky nejprve pečlivě odmastit.



**Obr. 2.42 - Pravidelná deformační síť pro snímání systémem Argus**

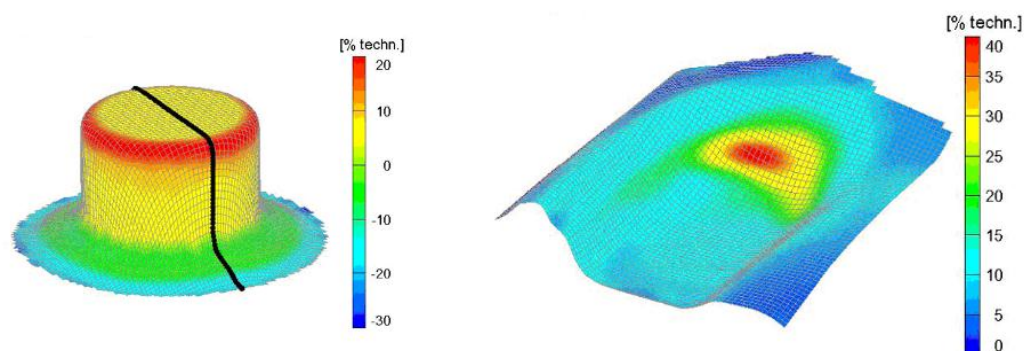
Po vytvoření deformační sítě na měřeném objektu lze provést jeho zatěžování. Společně s objektem se deformuje i mřížka bodů, která je vyleptaná na jeho povrchu. Po dokončení tvářecího procesu lze uskutečnit vlastní snímání. K tomu je potřeba měřený objekt s deformační sítí v počátečním nezdeformovaném stavu (před lisováním) a objekt se sítí v koncovém deformovaném stavu (po lisování). Stejně jako u ostatních systémů, tak i zde se před snímáním musí provést kalibrace systému. U systému Argus se ke kalibraci používají kalibrační kameny, které se rozmisťují po okraji vzorku. Na povrchu kalibračních kamenů jsou umístěny kalibrační body. Objekt v počátečním a koncovém stavu s rozmístěnými kalibračními kameny se poté nafotí snímacím zařízením. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny kalibrační kameny a ukázka jejich rozmístění okolo měřeného tělesa.



**Obr. 2.43 - Kalibrační kameny**

Na základě změn rozměrů a posuvů jednotlivých bodů nasnímané sítě mezi počátečním a koncovým stavem se pomocí softwaru vyhodnotí celé měření.

Výstupem z měření pak mohou být např. hodnoty hlavních a vedlejších deformací, hodnoty 3D posunutí, hodnoty změn tloušťky materiálu atd. Výsledky měření lze také ještě různě upravovat, třeba vytvářet řezy, barevně znázorňovat deformace nebo tvořit tabulkové výstupní protokoly.



**Obr. 2.44 - Ukázky výsledků měření (obrázek vlevo - znázornění redukce tloušťky, obrázek vpravo - znázornění hlavní deformace)**

### Základní typy měřicího systému Argus

Jednotlivé typy optického měřicího systému Argus se mezi sebou liší hlavně typem použité kamery, jejím rozlišením a rozlišením CCD čipu. Jednotlivé základní typy systému Argus s jejich technickými údaji jsou pro ilustrativnost zobrazeny v následující tabulce.

**Tab. 2.5 - Základní typy systému Argus**

	ARGUS 2M	ARGUS 5M	ARGUS 12M
Typ kamery [-]	FW camera	FW camera	Nikon D2X
Rozlišení kamery [px]	1600 x 1200	2440 x 2050	4280 x 2840
Rozlišení CCD čipu [px]	2000000	5000000	12000000
Rozsah měření deformace [%]	od 0,5 až do 300 a více		
Přesnost měření deformace [%]	do 0,1		

## 2.6 Numerická simulace procesu tváření [29, 30]

Začlenění výpočetní techniky do procesů tváření je neocenitelné, protože využití numerické simulace například v etapě vývoje součástí, ve fázi přípravy výroby nebo při návrhu náradí, se velmi pozitivně podepisuje na kvalitě, rychlosti práce nebo úsporách výrobních nákladů. Mezi další velice užitečné výhody numerického řešení patří možnost zkontrolování správnosti našeho návrhu na monitoru počítače ještě předtím, než bude daný díl vyroben. Samozřejmostí je také možnost pomocí počítače provádět podle potřeby dodatečné úpravy, což se může třeba projevit na snižování výrobních nákladů. Při řešení problematiky procesu tváření výlisků pomocí numerické simulace je využíváno metody konečných prvků s použitím posuvových, rychlostních a kontaktních okrajových podmínek. Díky výsledkům numerické simulace lze provádět detailní analýzy tvářecího procesu, určovat mezní stavy při tváření, zjišťovat rozložení napětí a

deformací, optimalizovat výchozí tvar polotovaru atd. Pro simulování tvářecího procesu existuje celá řada softwarů, ovšem v rámci této diplomové práce bylo pracováno s programem PAM-STAMP 2G.

### **2.6.1 PAM-STAMP 2G [29, 30]**

PAM-STAMP 2G je specializovaný simulační CAE (Computer Aided Engineering - počítačem podporované konstruování) software, který nachází uplatnění pro simulování plošného tváření (ohýbání, hluboké tažení, tváření plechů kapalinou atd.). Tento simulační program nabízí kompletní a efektivní řešení pro lisovací procesy a pokrývá celý proces výroby nástroje od návrhu, přes ověření tvařitelnosti, až po předpovědi odpružení a následné korekce. PAM-STAMP 2G má široké uplatnění například v automobilovém nebo leteckém průmyslu.

Jako vstupní data do softwaru PAM-STAMP 2G jsou používány modely nástrojů, které jsou vytvořeny v CAD programech (Pro/ENGINEER, CATIA, Inventor atd.). Tyto vstupní modely jsou generátorem automaticky převedeny na výpočtovou síť CAE modelu. Výpočtová síť polotovaru plechu je podle specifikace zadané uživatelem generována v grafickém prostředí pre-procesoru společně s potřebnými zatěžujícími, kontaktními a okrajovými podmínkami. Řešení rovnice rovnováhy vnějších a vnitřních sil je postaveno na explicitní definici metody konečných prvků. Chování materiálu se opírá o Hillovu definici podmínky plasticity (Hill 1948) se směrově závislou anizotropií plechu. Program PAM-STAMP 2G dále dovoluje do výpočtu připočítat kritéria porušování soudržnosti plechu v průběhu procesu tváření (např. ztenčení) s přímým zobrazením zvlnění přístřihu plechu v průběhu zavírání přidržovače a tažení.

### **2.6.2 Model VEGTER [31]**

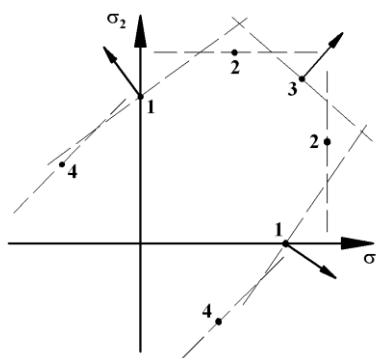
Model Vegter je další z řady materiálových výpočtových modelů, který lze využívat při simulování tvářecích procesů. Tento výpočtový model je přesnější než standardní modely (např. Hill 48, Hill 90 atd.), které se někdy nemusejí shodovat s měřeními. S modelem Vegter lze počítat ve dvou variantách. Existuje základní a odlehčená varianta tohoto modelu.

### 2.6.2.1 Základní varianta modelu Vegter

Pro zjištění všech parametrů pro základní variantu modelu je potřeba provést tyto mechanické zkoušky:

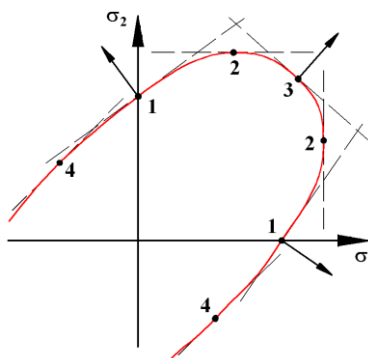
- Tahovou zkoušku **(1)**
- Plane Strain test **(2)**
- Bulge test (vypínání) **(3)**
- Shear test (smyk) **(4)**

Potřebné výsledky měření z těchto zkoušek jsou zaneseny do diagramu  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Díky tomu jsou získány body, kterými jsou proloženy normály (viz. následující obrázek). Směr normál v bodech, které leží přímo na osách (tahová zkouška - 1), závisí na velikosti koeficientů normálové anizotropie.



Obr. 2.45 - Model Vegter (konstrukce pomocí normál)

Poté se mezi naměřenými body provede interpolace pomocí Bézierovy křivky. Bézierova křivka patří mezi nejpoužívanější typy parametrických křivek, pomocí které lze také reprezentovat i interpolační křivky. Tato křivka prochází jen svým prvním a posledním řídícím bodem, ostatní body ovlivňují pouze výsledný tvar této křivky.



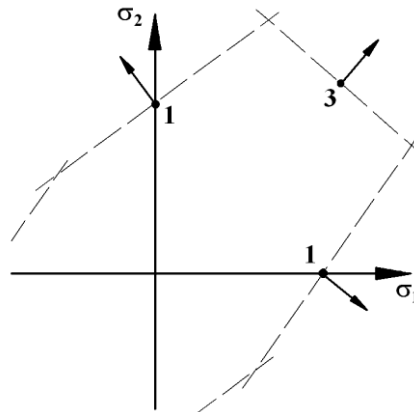
Obr. 2.46 - Model Vegter (ukázka interpolace pomocí Bézierovy křivky)



### 2.6.2.2 Odlehčená varianta modelu Vegter (Vegter Lite)

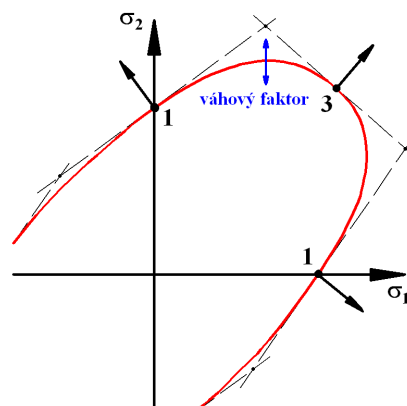
Odlehčená varianta modelu Vegter je obdobná, ovšem pro sestavení odlehčené varianty stačí z experimentálního měření získat daleko méně parametrů. Pro získání této varianty modelu dostačuje provést jen tahovou zkoušku a Bulge test.

Z měření se opět získají potřebná data, které se zanesou do souřadnic  $\sigma_1$  -  $\sigma_2$ . Získají se body, které se opět proloží normálami.



Obr. 2.47 - Model Vegter Lite (konstrukce pomocí normál)

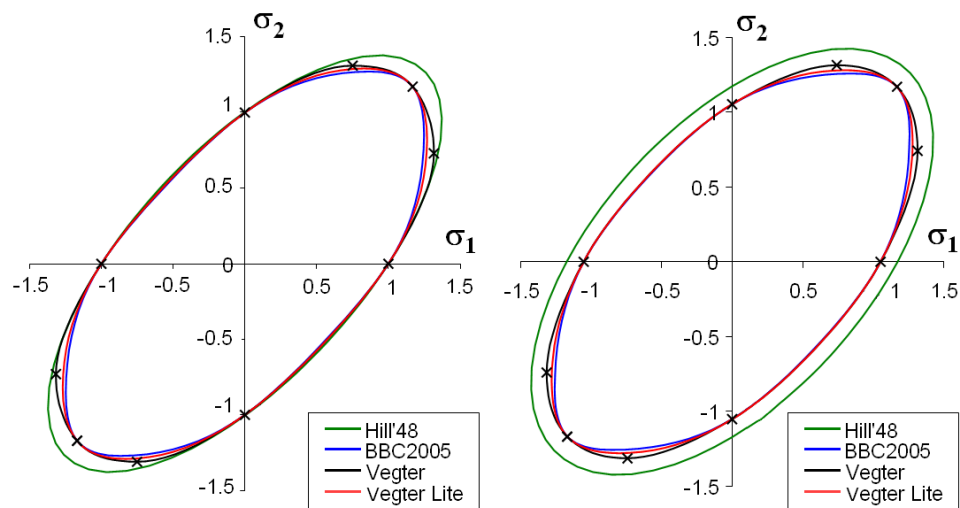
Mezi zjištěnými body se poté realizuje interpolace pomocí Nurb křivky. Jedná se o křivku, jejíž tvar závisí na poloze řídících bodů, uzlovém vektoru a váhách řídících bodů. Nurb křivky se řadí do skupiny interpolačních křivek, které obecně neprocházejí svými řídícími body, ale tyto body mají vliv na výsledný tvar křivky. Pokud je váha řídícího bodu kladná, je křivka k tomuto místu lokálně přitahována, v opačném případě je naopak odpuzována. Váhový faktor tedy určuje zploštění části křivky. Hodnoty váhového faktoru závisí na používaném materiálu.



Obr. 2.48 - Model Vegter Lite (interpolace pomocí Nurb křivky se zobrazením váhového faktoru)



Odlehčená varianta modelu Vegter v porovnání se základní variantou vyžaduje tedy méně parametrů potřebných pro jeho sestavení, nicméně má podobnou přesnost. Tento fakt dokládá následující obrázek, na kterém je vyobrazeno srovnání jednotlivých výpočtových modelů.



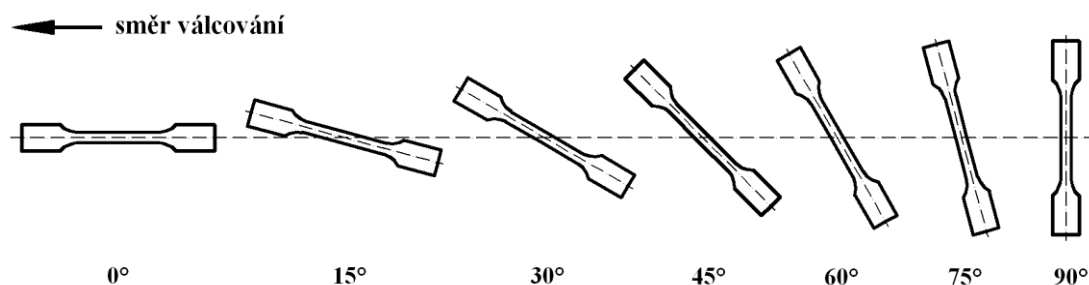
**Obr. 2.49 - Ukázka porovnání výpočtových modelů pro hlubokotažnou ocel DC04 (obrázek vlevo - vzorky odebrané ve směru válcování, obrázek vpravo - vzorky odebrané ve směru 45° ke směru válcování)**

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Úvod do experimentální části

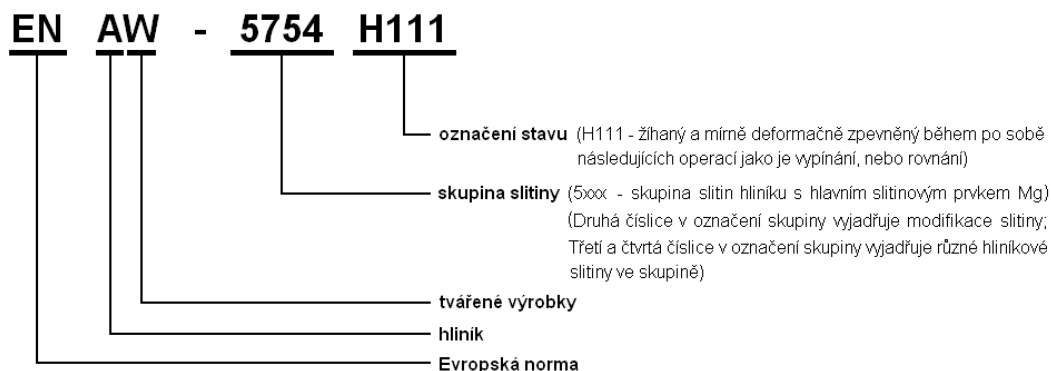
Úkolem této diplomové práce bylo zjištění vlivu výpočtového modelu na přesnost numerické simulace. Numerická simulace byla prováděna při uplatnění dvou výpočtových modelů: staršího modelu dle Hilla 48 a novějšího modelu dle Vegtera. Ke stanovení účinku výpočtového modelu na přesnost simulace bylo posléze uděláno porovnání a určení rozdílů mezi oběma výpočtovými modely a mezi reálným experimentem. Numerická simulace byla realizována v programu PAM-STAMP 2G. Pro experimentální měření (numerická simulace a reálný experiment) byl vybrán proces tažení a analýza deformace byla provedena na výlisku rotačního tvaru (kalíšek).

Pro splnění požadavků modelu dle Hilla 48 bylo nutné provést statickou zkoušku tahem na vzorcích, které byly odebrány ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  ke směru válcování plechu. Pro definici novějšího modelu dle Vegtera byla opět prováděna statická zkouška tahem, ovšem s tím rozdílem, že potřebné vzorky byly tentokrát odebírány ve směrech po  $15^\circ$  (viz. obrázek 3.1). U modelu podle Vegtera bylo dále nutné splnit požadavek na dvouosé vypínání, proto musela být ještě uskutečněna hydraulická zkouška vyboulováním (Bulge test). Zjištěné výsledky ze statických zkoušek tahem a z hydraulické zkoušky vyboulováním byly poté uplatněny k definování materiálu pro numerickou simulaci v programu PAM-STAMP 2G. Potom již bylo možné provést numerickou simulaci a porovnat oba výpočtové modely. Aby bylo zjištěno, o kolik se numerická simulace odlišuje od reálného experimentu, byla navíc ještě prováděna kalíšková zkouška. V rámci kalíškové zkoušky byly vytvořeny tři kategorie výtažků vylisovaných do tvaru kelímku. Kategorie výtažků se lišily původním průměrem kruhového vzorku plechu, ze kterého byl následně vytažen kelímek (1. kategorie -  $\varnothing 119,6$  mm; 2. kategorie -  $\varnothing 139,2$  mm; 3. kategorie -  $\varnothing 164,8$  mm).



Obr. 3.1 - Odebírané směry zkušebních vzorků pro statickou zkoušku tahem

Zkušebním materiálem, se kterým se v průběhu experimentálního měření pracovalo, byla hliníková slitina AlMg3, která byla dodána ve formě tabule plechu o rozměrech 1000x2000 mm firmou Alcom Alval s.r.o. Tloušťka plechu byla 1 mm. Přesné označení použité hliníkové slitiny AlMg3 podle normy je na následujícím obrázku.



**Obr. 3.2 - Přesné označení použité hliníkové slitiny**

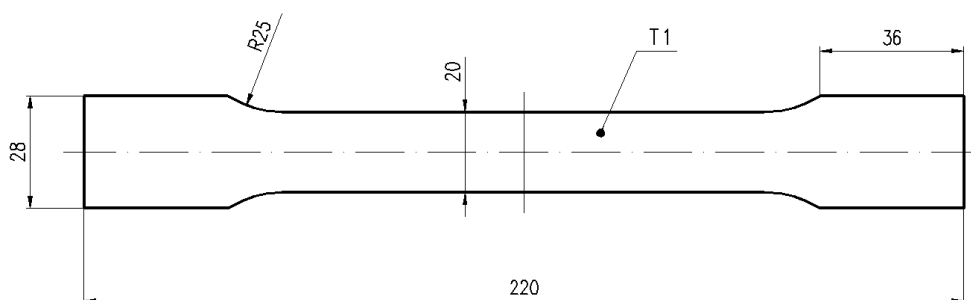
Na tomto místě je popsáno podrobnější označení použitého materiálu. Ve zbytku práce bude materiál označen již pouze AlMg3.

Experimentální měření a vyhodnocování zkoušek (statická zkouška tahem, hydraulická zkouška vyboulováním a kalíšková zkouška) bylo uskutečněno v prostorách lisovny kovů a laboratoře zkoušení kovů na Katedře strojírenské technologie Fakulty strojní TU v Liberci. Snímání kalíšků pomocí systému Argus bylo provedeno v prostorách lisovny ve firmě Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi. Pomoc s numerickou simulací s uplatněným modelem podle Vegtera byla poskytnuta společností MECAS ESI s.r.o. se sídlem v Plzni.

## 3.2 Statická zkouška tahem

### 3.2.1 Příprava zkušebních vzorků

Před vlastním měřením statické zkoušky tahem bylo nejprve nezbytné připravit si potřebné množství zkušebních vzorků z materiálu AlMg3. V rámci tohoto experimentu bylo pro vyhodnocení potřeba odebírat vzorky materiálu ve směrech  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  orientovaných ke směru válcování plechu. Pro potřeby měření bylo nutné zhotovit pro každý směr deset zkušebních vzorků. Tvar a rozměry zkušebních vzorků jsou zobrazeny na následujícím snímku.



Obr. 3.3 - Zkušební vzorek pro statickou zkoušku tahem

Všech 70 kusů vzorků bylo poté vyhotoveno pomocí střížného nástroje na výstředníkovém lisu LENP 40.

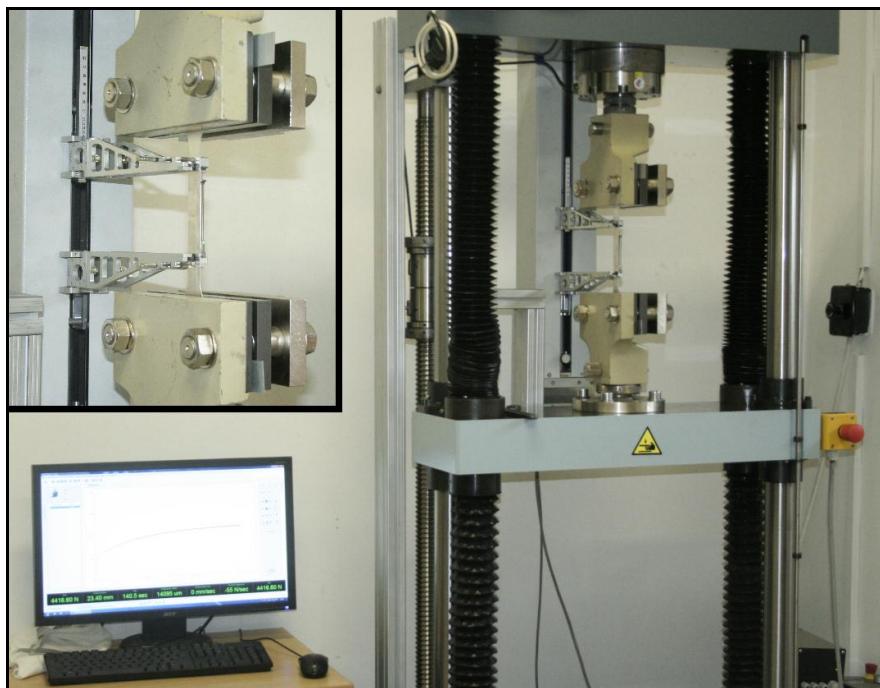


Obr. 3.4 - Příprava vzorků (obrázek vlevo - výstředníkový lis, obrázek vpravo - střížný nástroj)

Poté následovalo sražení hran na vzorcích pomocí pilníku, aby se odstranily přebytečné otřepty, které vznikly po předešlém procesu stříhání.

### 3.2.2 Statická zkouška tahem (měření základních veličin a zjištění aproximačních konstant)

V této fázi experimentálního měření byla statická zkouška tahem uskutečněna na pěti vzorcích od každého ze sedmi směrů. K realizování jednoosého zatěžování byl využit trhací zkušební stroj TIRATEST 2300, který byl připojen k počítači. Byla použita měřící hlava s rozsahem 10 kN. Vzorky byly deformovány při rychlosti zatěžování 10 mm/min. Pro snímání procesu byl použit tenzometrický snímač KAF 10 kN a extenzometr s označením MFN A 400-4.



Obr. 3.5 - Statická zkouška tahem (ve výřezu - detailní záběr na upnutý vzorek)

Statická zkouška tahem byla ukončena, když došlo k porušení vzorku. K vyhodnocení zkoušky a k získání základních mechanických vlastností zkoumaného materiálu AlMg3 byl použit měřící software LabNET.



Obr. 3.6 - Zkušební vzorek po provedené zkoušce (vzorek odebraný ve směru 45° ke směru válcování)

### 3.2.2.1 Vyhodnocení zkoušky

Z výstupních protokolů z této statické zkoušky tahem byly do následující tabulky zaznamenány střední aritmetické průměry základních měřených veličin společně s výběrovými středními odchylkami měření. Pro každý směr bylo uděláno pět měření. V příloze je pak pro ukázkou uveden jeden výstupní protokol pro každý měřený směr.

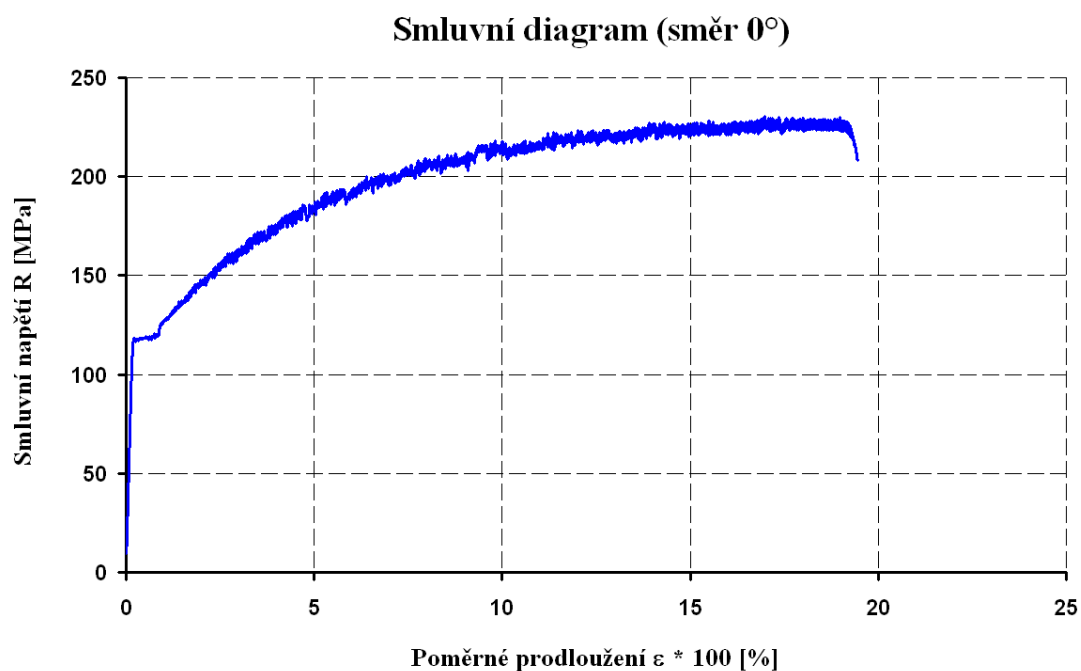
**Tab. 3.1 - Základní měřené veličiny**

Směr [°]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Dolní mez kluzu $R_{eD}$ [MPa]	Horní mez kluzu $R_{eH}$ [MPa]	Tažnost $A_{80mm}$ [%]
0	230,8 ± 0,5	117,0 ± 0,5	120,1 ± 0,6	18,78 ± 0,43
15	228,5 ± 0,7	116,2 ± 0,3	119,8 ± 0,2	20,88 ± 0,66
30	224,9 ± 0,8	115,2 ± 0,2	118,3 ± 0,5	22,54 ± 2,00
45	222,0 ± 0,6	116,3 ± 0,0	119,4 ± 0,3	23,87 ± 0,71
60	222,0 ± 0,7	117,0 ± 0,6	120,3 ± 0,2	24,25 ± 2,36
75	222,7 ± 0,2	117,9 ± 0,1	123,1 ± 0,3	23,78 ± 0,31
90	222,2 ± 0,3	118,9 ± 0,1	123,7 ± 1,5	22,48 ± 0,57

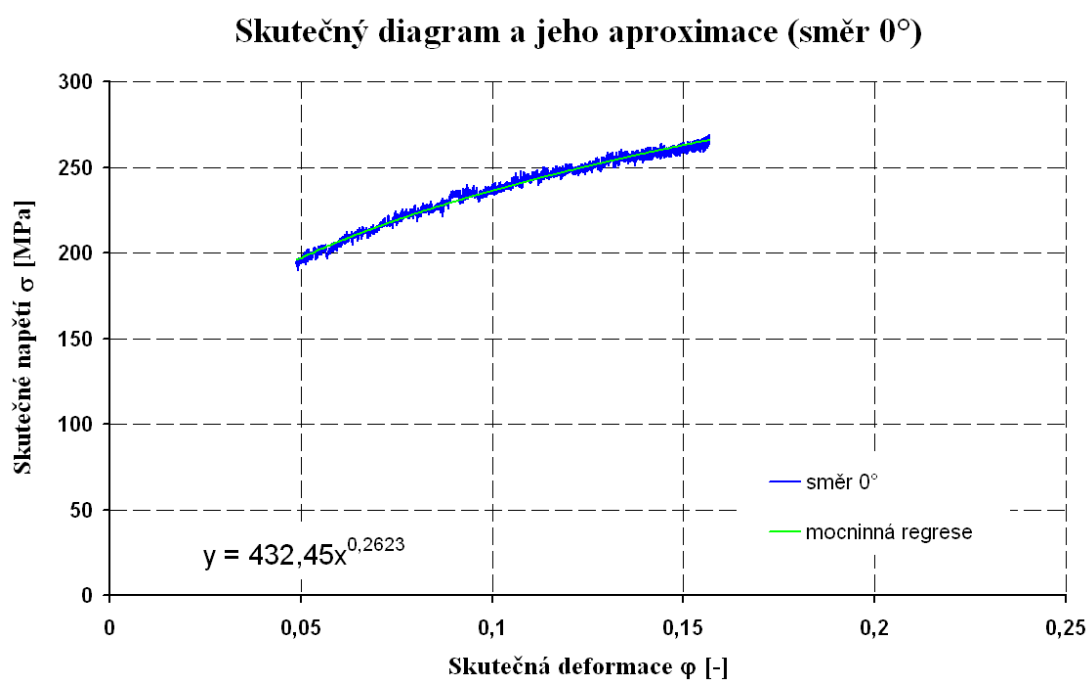
Výstupní data z této statické zkoušky tahem byla dále potřebována ke zjištění aproximačních konstant, pomocí kterých byl charakterizován materiál v programu PAM-STAMP 2G. V tomto simulačním programu se poté prováděla numerická simulace tažení kelímku za použití dvou výpočtových modelů: modelu dle Hilla 48 a modelu dle Vegtera. Z výstupních naměřených dat bylo nutné zjistit modul monotónního zpevnění  $C$ , exponent deformačního zpevnění  $n$  a ofsetovou deformaci  $\phi_0$ . Pro zjištění těchto tří hodnot bylo nutné z naměřených dat vytvořit smluvní a skutečný diagram statické zkoušky tahem. Pro zjištění konstant musel být skutečný diagram ještě aproximován. Aproximace byla prováděna v rozmezí skutečné deformace (přetvoření)  $\phi$  od hodnoty 0,05 až po hodnotu meze pevnosti.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny smluvní a skutečný diagram z provedené statické zkoušky tahem. Pro ukázkou jsou uvedeny diagramy z jednoho měření a pouze ve směru 0°. Diagramy ze zbývajících směrů jsou uvedeny v přílohách (opět pro ukázkou jen výsledky z jedné zkoušky).

### SMĚR 0°



**Obr. 3.7 - Smluvní diagram ze statické zkoušky tahem (směr 0°)**



**Obr. 3.8 - Skutečný diagram ze statické zkoušky tahem s doplněnou aproximací (směr 0°)**

Od každého směru bylo získáno pět hodnot modulu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění. Hodnoty byly zprůměrovány a zapsány do následující tabulky (tab. 3.2). Tabulka je také doplněna o průměrné hodnoty ofsetových deformací, které byly spočítány podle základního vztahu pro aproximaci podle Swift - Krupkowski.

**Tab. 3.2 - Zprůměrované hodnoty  $C$ ,  $n$ ,  $\varphi_0$**

Směr [°]	Průměrný modul monotónního zpevnění $C$ [MPa]	Průměrný exponent deformačního zpevnění $n$ [-]	Průměrná ofsetová deformace $\varphi_0$ [-]
<b>0</b>	431,370 ± 1,080	0,261 ± 0,001	0,00704 ± 0,00013
<b>15</b>	424,660 ± 1,660	0,261 ± 0,001	0,00724 ± 0,00010
<b>30</b>	413,585 ± 0,065	0,259 ± 0,001	0,00747 ± 0,00008
<b>45</b>	401,725 ± 1,795	0,251 ± 0,002	0,00750 ± 0,00016
<b>60</b>	401,030 ± 0,030	0,252 ± 0,001	0,00778 ± 0,00015
<b>75</b>	402,640 ± 1,470	0,252 ± 0,002	0,00826 ± 0,00019
<b>90</b>	406,415 ± 3,695	0,256 ± 0,004	0,00878 ± 0,00026

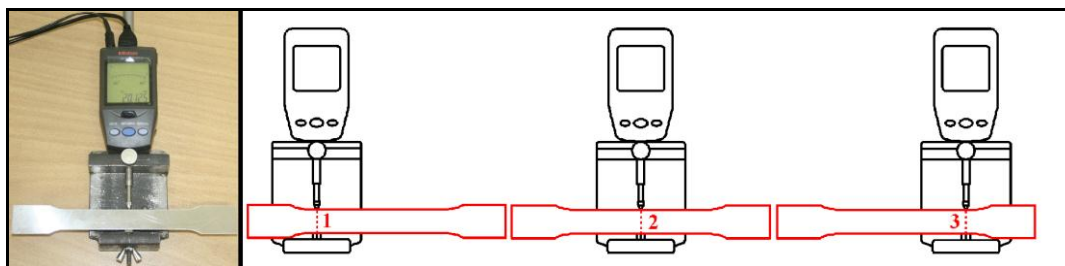
Pro každý směr byly tedy vypočítány průměrné hodnoty třech potřebných veličin. Z těchto hodnot byla poté spočítána střední hodnota každé veličiny. Tyto střední hodnoty byly pak zadávány do simulačního programu PAM-STAMP 2G pro definování materiálu. Při simulaci s modelem dle Hilla 48 byla brána střední hodnota ze základních směrů 0°, 45° a 90°. U modelu podle Vegtera byla střední hodnota určena ze všech sedmi směrů.

### 3.2.3 Statická zkouška tahem (měření koeficientu norm. anizotropie)

V této části laboratorního měření byla statická zkouška tahem prováděna téměř totožně jako v předchozím případě, jen s tím rozdílem, že měření bylo tentokrát ukončeno při protáhnutí vzorku o 12 mm. Hodnota 12 mm je dána normou a jedná se o oblast homogenní deformace. V rámci tohoto měření bylo pracováno se zbývajícimi vzorky (pět vzorků od každého směru). Jednoosý tah byl realizován opět na stejném měřícím stroji TIRATEST 2300.

Úkolem tohoto zkušebního měření bylo pro zkoumaný materiál AlMg3 zjistit hodnoty koeficientu normálové anizotropie pro každý ze sedmi směrů. V prvním kroku bylo nejprve nutné zjistit počáteční šířku na všech nenatažených vzorcích. Šířka byla měřena pomocí digitálního úchylkoměru značky Mitutoyo. Měření šířky bylo prováděno ve třech místech na zúžené části vzorku, což pro přehled znázorňuje i následující obrázek.





Obr. 3.9 - Měření šířky vzorku pomocí digitálního úchylkoměru

Hodnoty šířek měřených ve třech místech byly poté zprůměrovány. Průměrná hodnota byla označena jako  $B_0$ .

V následujícím kroku bylo všech 35 kusů vzorků opatřeno ryskami pomocí speciálního zařízení (viz. obr. 3.10). Takto orýsované vzorky byly poté uchyceny v Abbeho komparátoru (viz. obr. 3.10), díky kterému byly zjištěny hodnoty počátečních délek vzorků  $L_0$  před provedením zkoušky.



Obr. 3.10 - Abbeho komparátor (obrázek vlevo), zařízení pro tvorbu rysek (obrázek vpravo)

V další fázi již bylo možné provést statickou zkoušku tahem. Po upnutí vzorku a přiložení průtahoměru bylo možno spustit zkoušku. V této části experimentu ovšem tahová zkouška nekončila při přetržení vzorku, ale byla zastavena při natažení vzorku o 12 mm. Natažené vzorky byly poté opět přeměřeny, stejně jako před zkouškou, a tím byly získány hodnoty  $B_1$  a  $L_1$ , které byly také zaznamenány do tabulky. Hodnota  $B_1$  byla brána opět jako průměr ze tří naměřených hodnot šířek, ovšem tentokrát již na natažených vzorcích.

### 3.2.3.1 Vyhodnocení zkoušky

Hodnota koeficientu normálové anizotropie pro každý měřený směr byla pak vypočítána podle vztahu (25). V následující tabulce jsou pro shrnutí uvedeny již výsledné hodnoty koeficientu normálové anizotropie. Hodnoty v červeně orámovaných rádcích jsou hodnoty, které využívá výpočtový model dle Hilla 48. Model Vegter pracuje se všemi sedmi hodnotami.

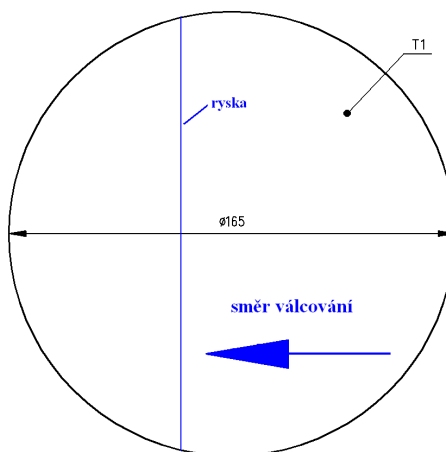
**Tab. 3.3 - Výsledné hodnoty koeficientu normálové anizotropie**

Koeficient normálové anizotropie $r$ [-]	
Směr [°]	Zjištěná hodnota [-]
0	$0,651 \pm 0,019$
15	$0,662 \pm 0,022$
30	$0,733 \pm 0,040$
45	$0,759 \pm 0,055$
60	$0,778 \pm 0,058$
75	$0,701 \pm 0,023$
90	$0,661 \pm 0,045$

### 3.3 Hydraulická zkouška vyboulováním (BULGE TEST)

#### 3.3.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro potřeby hydraulické zkoušky vyboulováním bylo nutné ze zkoumaného materiálu AlMg3 vyhotovit čtyři zkušební vzorky kruhového tvaru. Zkušební vzorek byl získán ze stejné tabule plechu jako vzorky pro statickou zkoušku tahem. Rozměry kruhového vzorku jsou znázorněny na obrázku 3.11.



**Obr. 3.11 - Zkušební vzorek pro Bulge test**

Hydraulická zkouška vyboulováním byla snímána pomocí bezkontaktního optického systému Aramis. Pro tyto účely bylo nutné všechny čtyři zkušební vzorky opatřit specifickou deformační sítí, tzv. patternem. Tvorba patternu se skládala z několika fází. Vzorky se musely nejprve odmastit. K tomuto úkonu byl užit technický aceton, pomocí kterého byly z povrchu vzorků odstraněny nežádoucí nečistoty. V dalším kroku následovalo nanesení vrstvičky bílé barvy na povrch jedné strany každého vzorku. Po krátké době a částečném

zaschnutí se pak nakonec tento bílý povrch poprášil drobnými kapičkami barvy černé. Pro nástřik barev bylo použito černé a bílé barvy ve spreji.

Podmínkou, která byla při nanášení černé barvy dodržena, bylo zabránění tvorby příliš velkých černých kapek nebo naopak příliš velkých bílých míst na povrchu zkušební vzorku. Díky těmto vadám by totiž systém Aramis nemusel tento nevhodný povrch zachytit. Další podmínkou, která byla splněna, je fakt, že nanesený pattern nesmí být při deformaci zcela zaschlý, proto bylo možno téměř ihned po nanesení barev provést na opatternovaném vzorku hydraulickou zkoušku vyboulováním.

### 3.3.2 Proces měření

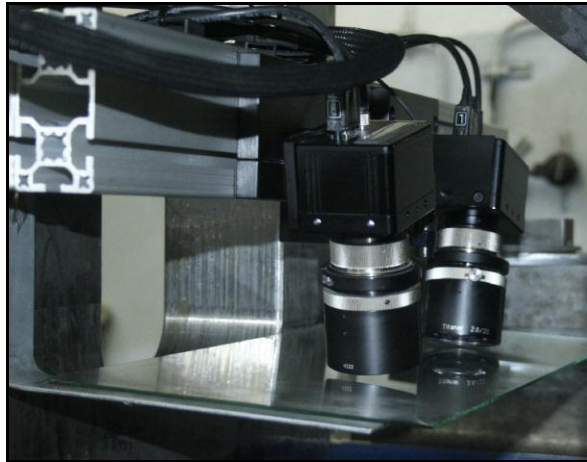
Hydraulická zkouška vyboulováním (Bulge test) byla realizována na hydraulickém lisu CBA 300/63. Průběh Bulge testu byl snímán bezkontaktním optickým měřícím systémem Aramis (2 digitální CCD kamery, trigger, notebook se softwarem pro zpracování a vyhodnocení dat, držák pro uchycení kamer, halogenová lampa, propojovací kabely). Frekvence snímání kamer u systému Aramis byla 6 Hz. K vyvození potřebného tlaku, díky kterému tvářecí kapalina působí zespodu na zkušební kruhový vzorek a vybouluje ho, byl použit hydraulický agregát. Jako tvářecí kapalina byl použit hydraulický olej. Uspořádání této laboratorní zkoušky je vyobrazeno na následujících snímcích.



**Obr. 3.12 - Bulge test (obr. vlevo - hydraulický lis, obr. vpravo - hydraulický agregát)**

Ještě před samotným měřením této hydraulické zkoušky bylo nutné uchytnout obě digitální kamery systému Aramis v prostoru nad zkoušeným vzorkem. K tomu posloužil držák, na kterém byly kamery uchyceny tak, že jejich směr byl kolmý na směr válcování. Hydraulická zkouška vyboulováním pomocí kapaliny byla v rámci tohoto měření ukončena při vzniku praskliny na povrchu vzorku. Vytvoření praskliny je doprovázeno zvukovým efektem a olej vystříkne skrz vzniklou prasklinu ven. Z tohoto důvodu bylo nutné umístit

před kamery dokonale očištěnou tabulku skla, která zamezila styku oleje s kamerami. Po procesu uchycení kamer a umístění ochranného skla bylo již možno provést kalibraci systému Aramis.



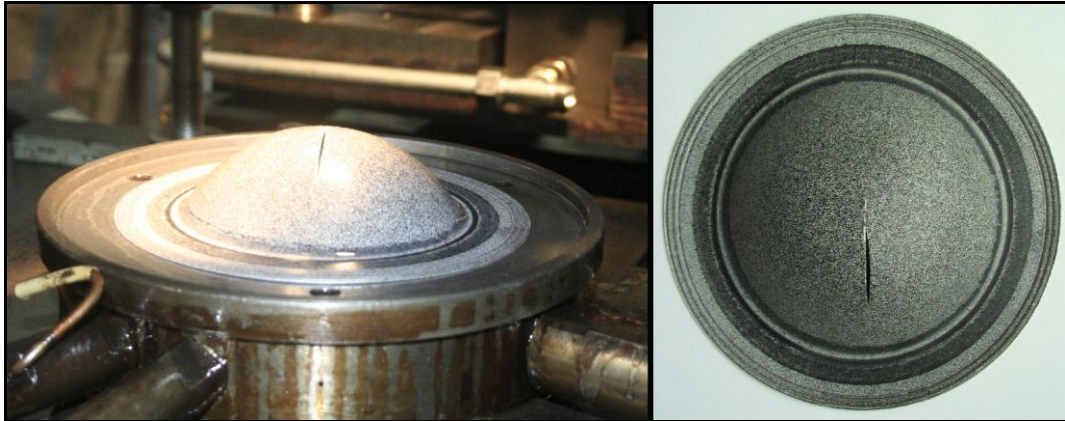
**Obr. 3.13 - Detail na digitální kamery s umístěným ochranným sklem**

Kalibrace byla provedena pomocí kalibrační destičky. Vlastní kalibrace potom spočívala v posouvání, v natáčení a v naklánění této kalibrační destičky podle pokynů měřicího softwaru v prostoru mezi kamerami a zkoušeným vzorkem. Po skončení kalibrace si kamery určily kalibrační objem a měřící systém byl připraven ke snímání procesu.

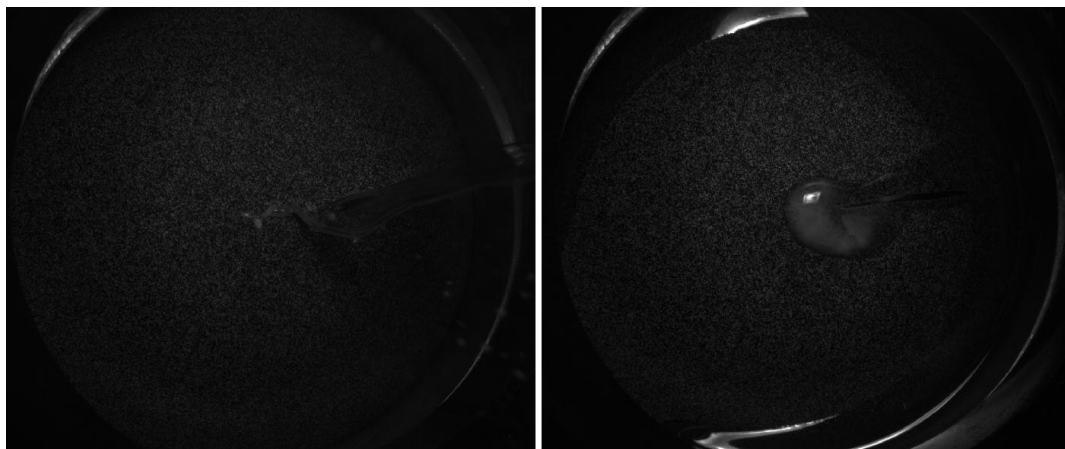
Zkušební vzorek byl poté umístěn (patternem nahoru) na střed dolní tažnice. Na vzorek byla potom položena horní tažnice. Horní tažnice měla průměr 104,4 mm a rádius 10 mm. Takto připravený nástroj se vzorkem byl nakonec strojem upnut, přidržen a vše bylo připraveno ke spuštění testu.

Pomocí hydraulického agregátu byl nastavován tlak oleje, který působil na zkušební vzorek. Deformace vzorku byla snímána kamerami, které v určité nastavené frekvenci (6 Hz) pořizovaly snímky procesu a ukládaly je do počítače. Tím jak se v průběhu zkoušky deformoval zkušební vzorek, tak se deformoval i pattern nanesený na jeho povrchu. Ze změn poloh jednotlivých bodů patternu mohl měřící software provést analýzu deformace vzorku v průběhu zatěžování. V průběhu zkoušky se tlak hydraulického oleje ve stejných časových intervalech postupně navyšoval o hodnotu 0,5 MPa. Test byl ukončen při vzniku trhliny na povrchu vyboulení vzorku. Trhlina na vzorku se vytvořila přibližně na vrcholu jeho vyboulení při tlaku 6,8 MPa a byla rovnoběžná se směrem válcování. Tento postup (bez kalibrace) byl poté opakován i na ostatních zbylých vzorcích.





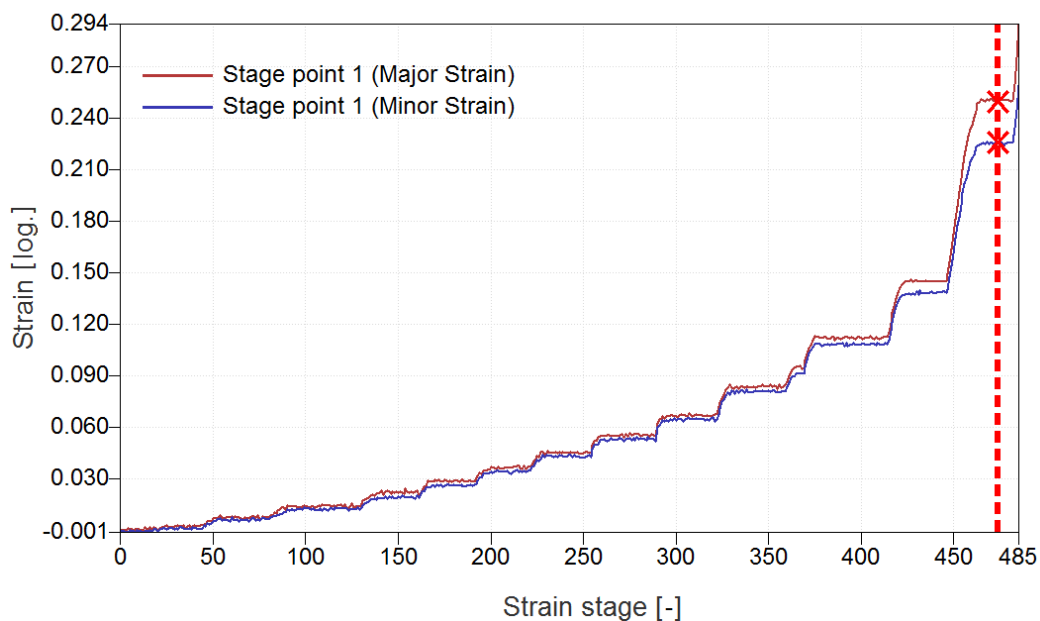
Obr. 3.14 - Zkušební vzorek po ukončení hydraulické zkoušky vyboulováním



Obr. 3.15 - Porušení vzorku zachycené kamerami systému Aramis

### 3.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení zkoušky bylo provedeno pomocí softwaru měřicího systému Aramis. Díky tomuto softwaru bylo možné vytvořit grafickou závislost hlavní a vedlejší deformace ( $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ ) na pořízených snímcích (obr. 3.16). Na tomto grafu je znázorněn průběh hlavní deformace (červená křivka) a vedlejší deformace (modrá křivka). Na grafu jsou dále patrné prodlevy, kdy nedocházelo ke změnám deformace. Tyto prodlevy odpovídají stavům, kdy bylo dosaženo nastaveného tlaku tvářecího oleje a čekalo se na zvyšování tlaku o dalších 0,5 MPa. Z grafu je ještě zřetelné, že čím vyšší byl nastavený tlak, tím vyšší byl i rozdíl mezi hlavní a vedlejší deformací (nejvíce je to patrné u posledních třech prodlev na tlacích 5,5; 6,0 a 6,5 MPa).



Stage 474

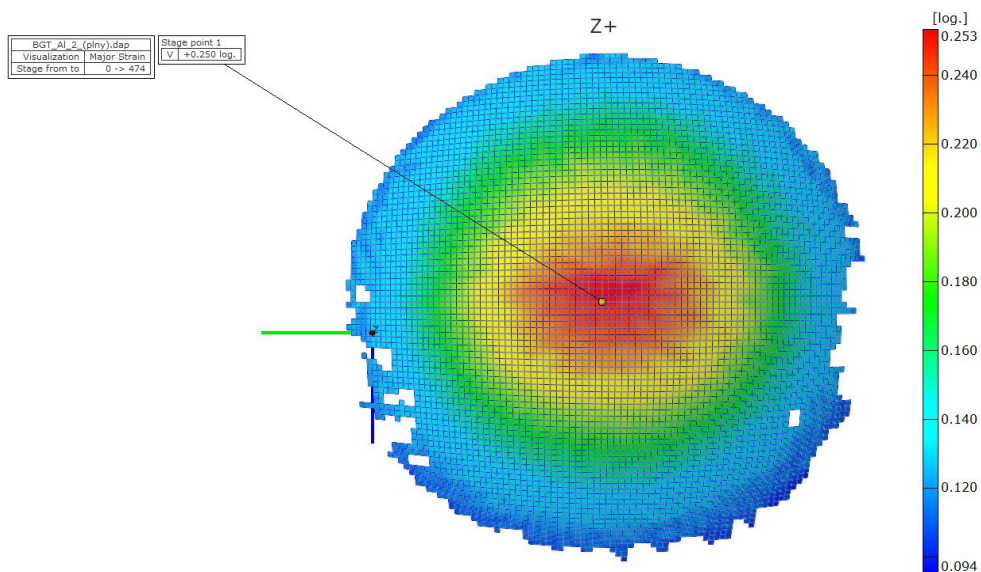
ARAMIS

2/8/12

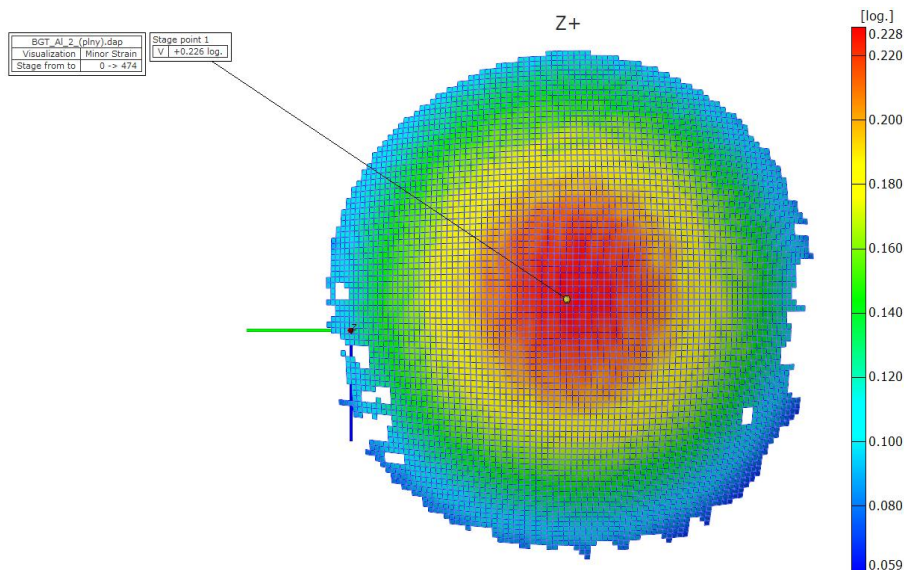
gom  
www.gom.com

**Obr. 3.16 - Závislost hlavní a vedlejší deformace na pořízených snímcích**

Software systému Aramis dále umožňuje například vytvoření barevných map deformací na zkoumaném vzorku v průběhu celého měření. Na předchozím grafu je znázorněno odečítání deformací na snímku č. 474, což odpovídalo tlaku 6,5 MPa (poslední nastavený tlak před vznikem trhliny). Na následujících obrázcích jsou vidět barevné mapy hlavní a vedlejší deformace pro snímek č. 474.

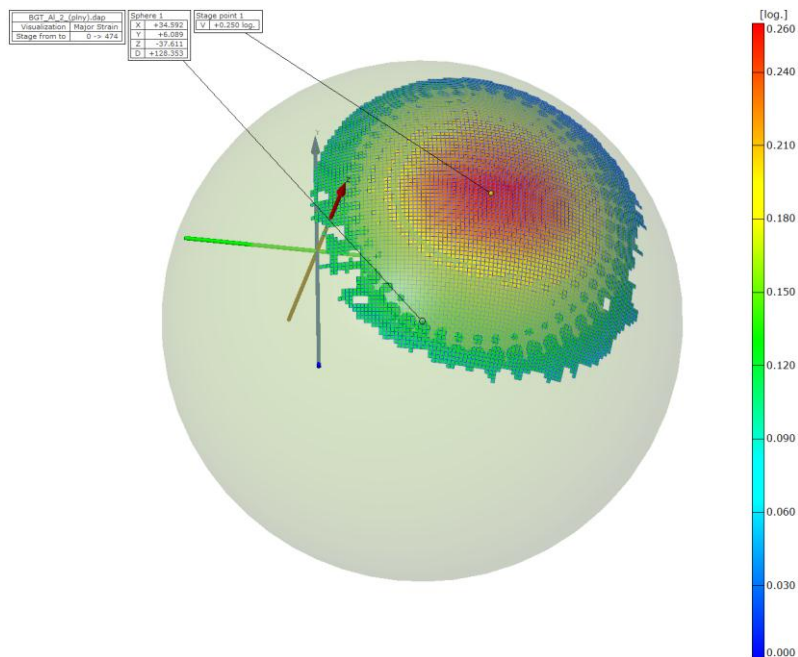


**Obr. 3.17 - Barevná mapa hlavní deformace**



**Obr. 3.18 - Barevná mapa vedlejší deformace**

V další fázi vyhodnocování hydraulické zkoušky vyboulování bylo nutné na jednotlivých prodlevách odečíst hodnoty hlavních, vedlejších deformací a zjistit poloměr zakřivení zkušební vzorku. Software systému Aramis umí vyboulení vzorku doplnit na celou kouli, takže pak již bylo snadné zjistit hodnotu poloměru zakřivení (obr. 3.19). Do následující tabulky (tab. 3.4) byly poté zapsány průměrné hodnoty zjišťovaných veličin, které byly získány ze čtyř měření.



**Obr. 3.19 - Ukázka doplnění vybouleného vzorku na celou kouli**

**Tab. 3.4 - Hodnoty  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  a poloměru zakřivení plechu**

Tlak tvářecího oleje $p$ [MPa]	Hl. deformace $\varphi_1$ [-]	Vedl. deformace $\varphi_2$ [-]	Poloměr zakřivení plechu [mm]
0,5	0,003	0,001	353,338
1,0	0,008	0,006	248,555
1,5	0,015	0,013	192,704
2,0	0,023	0,020	161,737
2,5	0,028	0,027	141,285
3,0	0,036	0,034	126,043
3,5	0,045	0,043	114,206
4,0	0,056	0,053	104,318
4,5	0,067	0,065	95,558
5,0	0,084	0,081	87,999
5,5	0,112	0,108	79,678
6,0	0,146	0,138	73,758
6,5	0,250	0,226	64,177

V poslední části vyhodnocení této zkoušky bylo nutné stanovit hodnoty intenzit napětí a intenzit deformace pro jednotlivé tlaky, aby bylo možné získat závislost intenzity napětí na intenzitě deformace.

Nejprve bylo potřebné spočítat hodnoty deformace ve směru tloušťky  $\varphi_3$  podle vztahu (43).

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \Rightarrow \varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (43)$$

Poté se ze vztahu (44) vypočítaly hodnoty okamžitých tlouštěk vzorku  $s$ . Počáteční tloušťka vzorku  $s_0$  byla 1 mm.

$$\varphi_3 = \ln \frac{s}{s_0} \quad (44)$$

Následně se musely zjistit hodnoty skutečných napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ . V případě rotačně symetrické membrány platí, že  $\sigma_1 = \sigma_2$  a  $R_1 = R_2$ . Proto se vztah (45) zjednoduší na vztah (46).

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{s} \quad (45)$$

$$2 \cdot \frac{\sigma}{R} = \frac{p}{s} \Rightarrow \sigma = \frac{p \cdot R}{2 \cdot s} \quad (46)$$

kde:  $R$  - poloměr zakřivení plechu [mm]  
 $p$  - tlak tvářecího oleje [MPa]  
 $s$  - okamžitá tloušťka vzorku [mm]



Intenzita napětí  $\sigma_i$  byla určena na základě vztahu (47). Díky tomu, že  $\sigma_1 = \sigma_2$  a  $\sigma_3 = 0$  je vztah (47) zjednodušen do podoby (48).

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (47)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma^2} \quad (48)$$

Pro intenzitu deformace platí vztah (49).

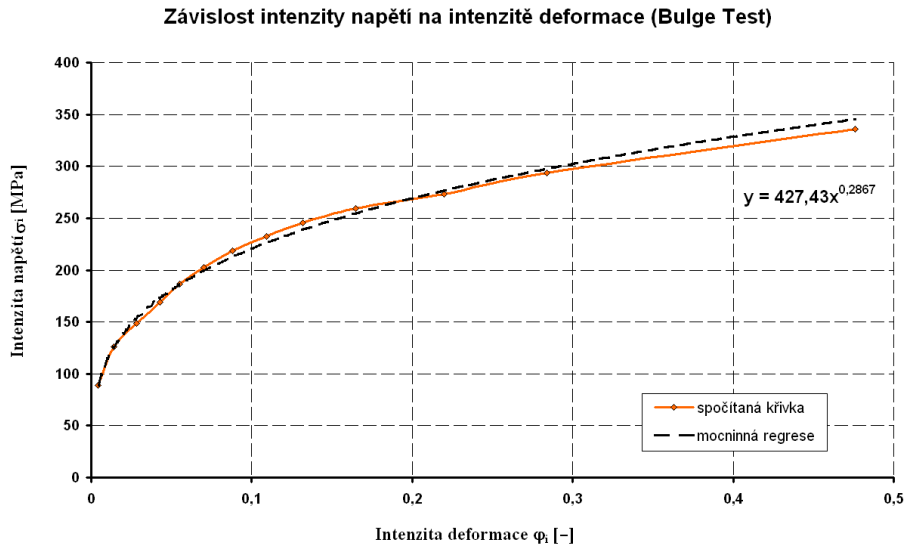
$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad (49)$$

Vypočítané hodnoty intenzit napětí a deformace pro jednotlivé tlaky tvářecího média jsou zapsány v následující tabulce.

**Tab. 3.5 - Hodnoty  $\sigma_i$  a  $\varphi_i$**

Tlak tvářecího oleje $p$ [MPa]	Intenzita napětí $\sigma_i$ [MPa]	Intenzita deformace $\varphi_i$ [-]
0,5	88,689	0,004
1,0	126,030	0,014
1,5	148,632	0,028
2,0	168,843	0,043
2,5	186,591	0,055
3,0	202,773	0,070
3,5	218,245	0,088
4,0	232,663	0,109
4,5	245,345	0,132
5,0	259,464	0,165
5,5	273,033	0,220
6,0	293,948	0,284
6,5	335,725	0,476

Závislost intenzity napětí na intenzitě deformace byla poté převedena do grafické podoby.



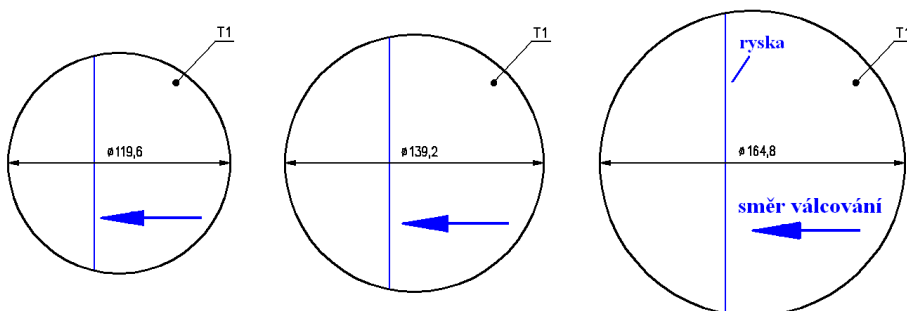
**Obr. 3.20 - Závislost intenzity napětí na intenzitě deformace**

Tato grafická závislost je poté uplatněna při sestavování výpočtového modelu dle Vegtera.

### 3.4 Kalíšková zkouška

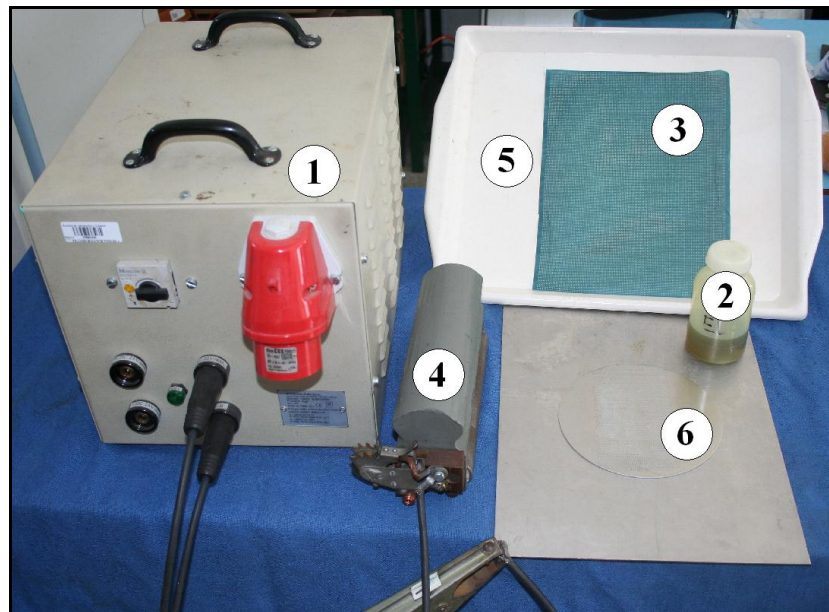
#### 3.4.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro provedení kalíškové zkoušky bylo potřebné si připravit vzorky kruhového tvaru, takže získání vzorků z tabule plechu z hliníkové slitiny AlMg3 a jejich úprava na požadované rozměry byla stejná jako u předchozí hydraulické zkoušky. Rozdíl oproti předchozí zkoušce ovšem byl v tom, že pro kalíškovou zkoušku bylo nutné si vyhotovit 9 kruhových vzorků. Byly zhotoveny 3 kategorie vzorků, které se lišily hodnotami průměrů (1. kategorie - Ø 119,6 mm; 2. kategorie - Ø 139,2 mm; 3. kategorie - Ø 164,8 mm). Od každé kategorie byly připraveny 3 vzorky. Na každém z devíti vzorků byla poté načrtnuta ryska, která znázorňovala směr kolmý na směr válcování plechu.



**Obr. 3.21 - Kategorie zkušebních vzorků pro kalíškovou zkoušku**

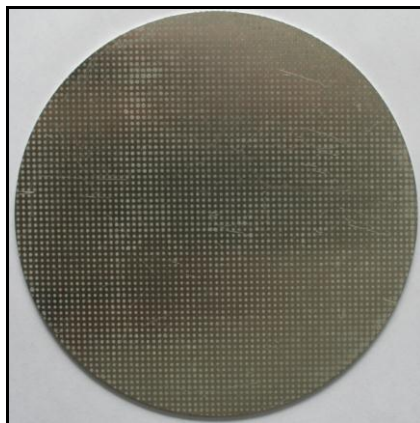
V další fázi přípravné činnosti bylo nezbytné opatřit povrch vzorků bodovou deformační sítí, aby mohla být provedena analýza deformace pomocí optického měřicího systému Argus. Bodová deformační síť byla nanášena metodou elektrolytického leptání. Aby bylo možné provést metodu elektrolytického leptání, muselo být připraveno následující: zdroj elektrického proudu (stejnosměrného, střídavého), elektrolyt, šablona s bodovou sítí, plstěná tkanina, pojezdové válečky, miska a zkušební vzorek.



**Obr. 3.22 - Metoda elektrolytického leptání (1 - zdroj el. proudu, 2 - elektrolyt, 3 - šablona s bodovou sítí, 4 - pojezdové válečky, 5 - miska, 6 - vzorek)**

Když bylo nachystáno vše potřebné, mohlo se začít s tvorbou deformační sítě. Nejprve bylo nutné povrch vzorků očistit od nečistot a odmastit pro zaručení kvalitnějšího nanášení sítě. Síť byla vytvořena na té straně vzorku, kde nebyla vyznačena ryska znázorňující kolmý směr ku směru válcování. Odmaštěný zkušební vzorek byl poté uložen na plech, který byl pomocí svorky připojen na zdroj střídavého proudu. Přes vzorek byla následně položena šablona s bodovou sítí. Na tuto šablonu byla pak dána plstěná tkanina, která byla dostatečně nasáklá elektrolytem. Po takto navrstvených částech již bylo možno přejíždět pojezdovými válečky, které byly také napojeny na zdroj střídavého proudu. Po pár přejetích válečků přes vzorek se poté na povrchu vzorku vytvořila bodová deformační síť.

Deformační síť nanášená přes celý povrch vzorku byla u prvních dvou kategorií vytvořena na každém ze tří vzorků. Na třetím vzorku z poslední největší kategorie byla síť nanášena jen zčásti. Na tomto posledním vzorku s částečně nanášenou sítí ani nebylo realizováno tažení, protože sloužil při snímání systémem Argus jako stav, který charakterizuje výlisek před lisováním. Na následujícím snímku je pak zobrazen zkušební vzorek s nanášenou bodovou deformační sítí.



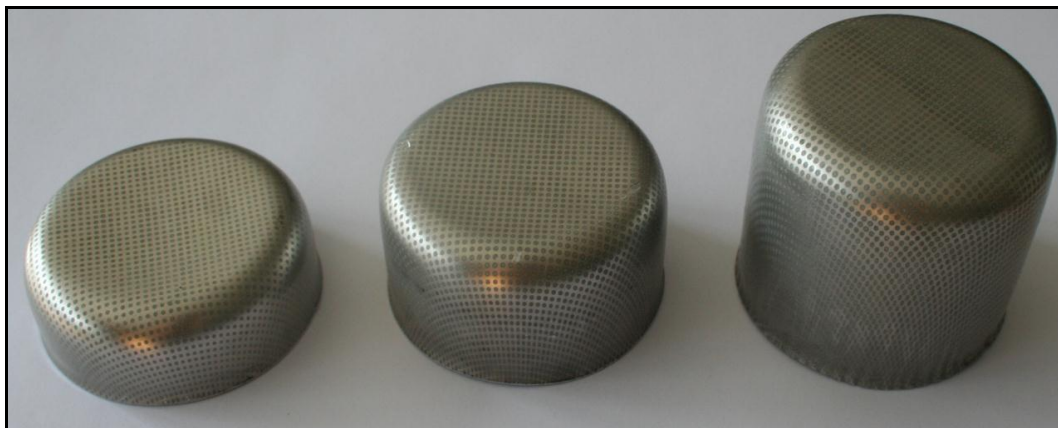
Obr. 3.23 - Připravený vzorek pro kalíškovou zkoušku

### 3.4.2 Proces měření

Jak již bylo zmíněno v úvodu do experimentu (kap. 3.1) touto zkouškou byly vytvořeny tři druhy kalíšků, které poté sloužily k porovnání výsledků mezi numerickou simulací a reálným experimentem. Kalíšková zkouška byla prováděna na klikovém lisu LU 160 při přidržovacím tlaku 4 MPa. Tažení bylo uskutečněno na všech vzorcích, které měly deformační síť nanesenou na celém povrchu. Průběh tažení každého kalíšku byl zaznamenáván počítačem, který proces tažení snímal s frekvencí 2 kHz. Před tažením každého kalíšku byla na povrch tažníku a tažnice nanesena tenká vrstva oleje typu Prelube. Použitý tažník měl průměr 75,9 mm a rádius 10 mm. Tažnice měla průměr 80 mm a rádius 7 mm. Poté, co byl zkušební vzorek umístěn na střed tažnice (obr. 3.24) deformační síť dolů, bylo možné začít zkoušku. V okamžiku, ve kterém byl spuštěn tažník, musel být zároveň sepnut spínač pro zaznamenání procesu do počítače.



Obr. 3.24 - Kalíšková zkouška (obr. vlevo - klikový lis LU 160, obr. vpravo - detailní záběr na nástroj)

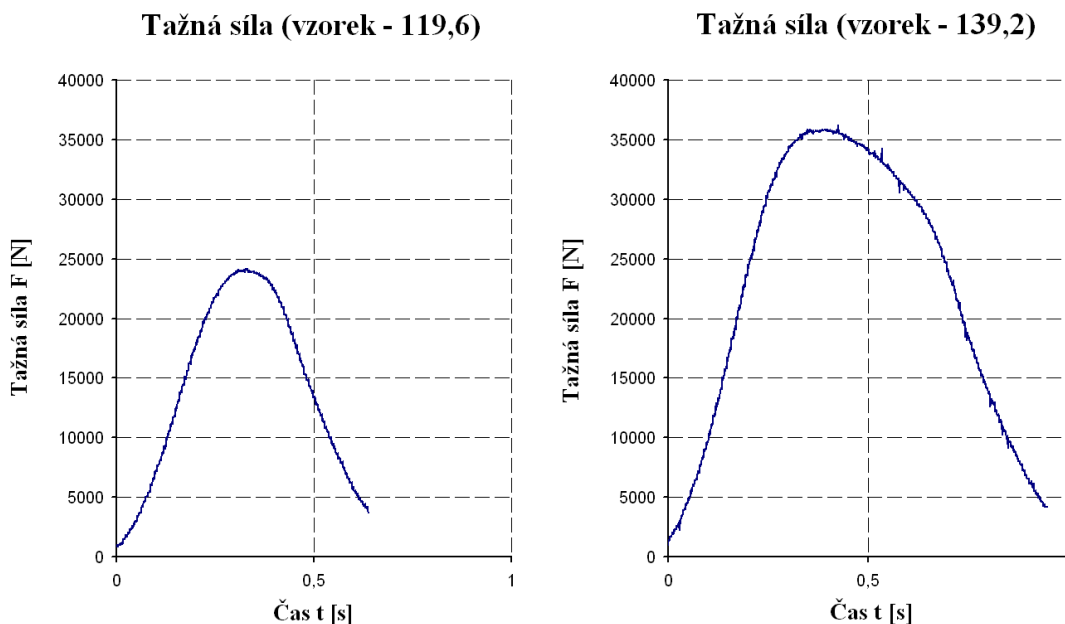


Obr. 3.25 - Vytažené kalíšky po provedené zkoušce

### 3.4.3 Vyhodnocení kalíškové zkoušky

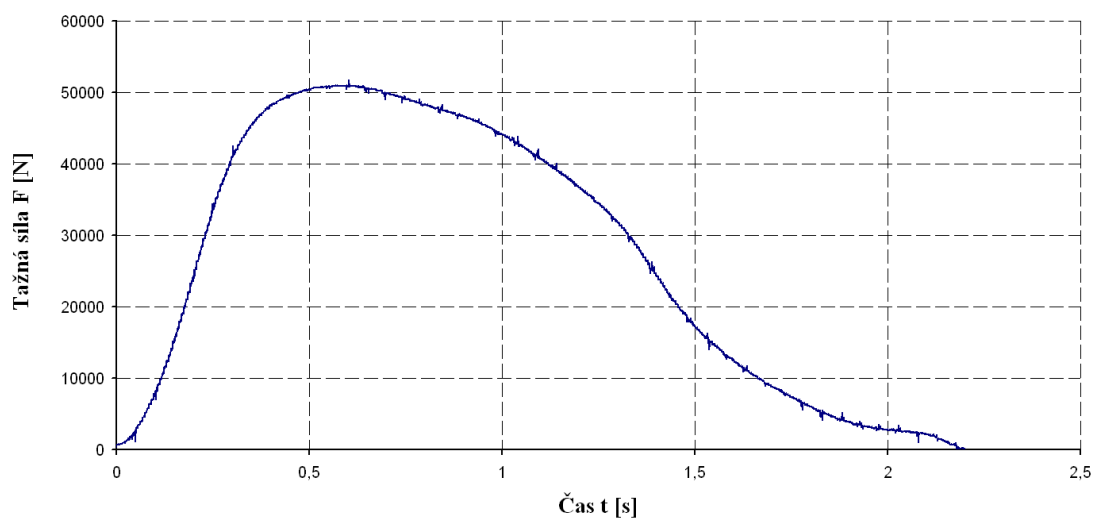
#### Tažná síla

Z dat, která byla v průběhu kalíškové zkoušky snímána a zaznamenána do počítače, byl vyhodnocen průběh tažné síly. Proces tažení byl počítačem snímán frekvencí 2 kHz, tzn. za 1 vteřinu bylo uloženo 2000 hodnot. Průběhy tažné síly pro jednotlivé kategorie vzorků jsou znázorněny v následujících grafech.



Obr. 3.26 - Průběh tažné síly (obrázek vlevo - vzorek 119,6; obrázek vpravo - vzorek 139,2)

**Tažná síla (vzorek - 164,8)**

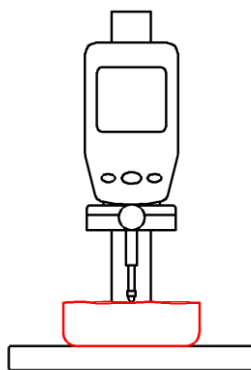


**Obr. 3.27 - Průběh tažné síly (vzorek 164,8)**

### Cípatost

Výslednými produkty, které vznikly po vykonání kalíškové zkoušky, byly tedy výtažky ve tvaru kelímku (kalíšku). Na okrajích těchto kelímků je patrný efekt, který je způsoben plošnou anizotropií materiálu. Tento efekt je nazýván jako cípatost. Cípatost je tím výraznější, čím větší kruhový vzorek byl použit.

Pro ruční měření cípatosti bylo nejprve nutné si po okrajích každého vzorku načrtnout rysky. Tím byla vymezena místa, ve kterých se měřila výška kalíšku. Rysky byly vyznačeny na okrajích vzorků kolem dokola po  $15^\circ$ . Měření výšky kelímku v každém bodě bylo prováděno pomocí digitálního úchylkoměru značky Mitutoyo. Schéma ručního měření cípatosti pomocí digitálního úchylkoměru je uvedeno na následujícím obrázku.

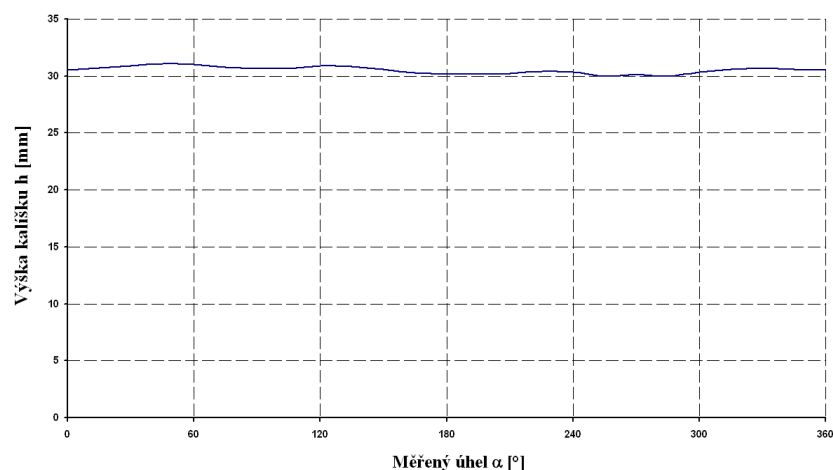


**Obr. 3.28 - Ruční měření cípatosti pomocí digitálního úchylkoměru**

Naměřené údaje výšek na okrajích kelímků po  $15^\circ$  byly zapsány do tabulek, ze kterých byly vytvořeny pro 3 kategorie vzorků přehledné grafy.

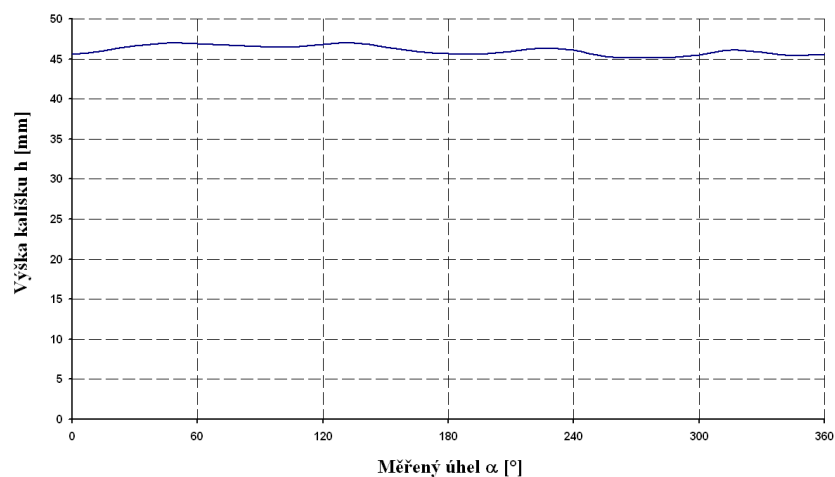


**Cípatost (vzorek - 119,6)**



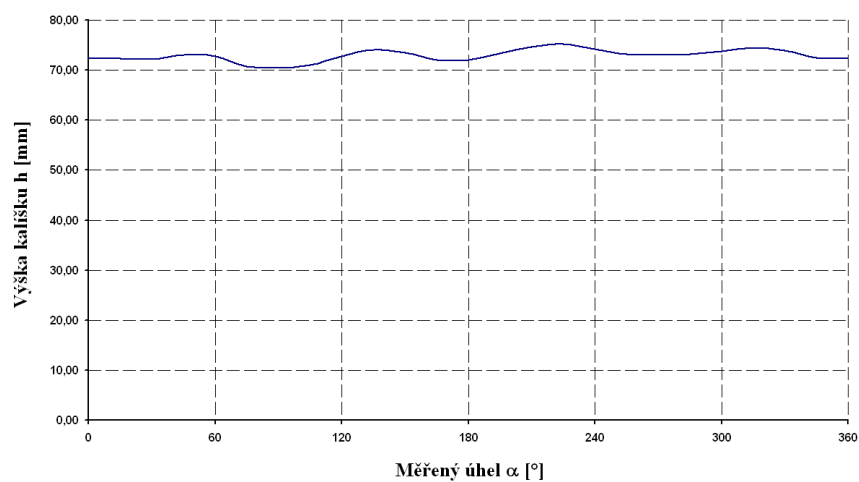
**Obr. 3.29 - Cípatost (vzorek 119,6)**

**Cípatost (vzorek - 139,2)**



**Obr. 3.30 - Cípatost (vzorek 139,2)**

**Cípatost (vzorek - 164,8)**

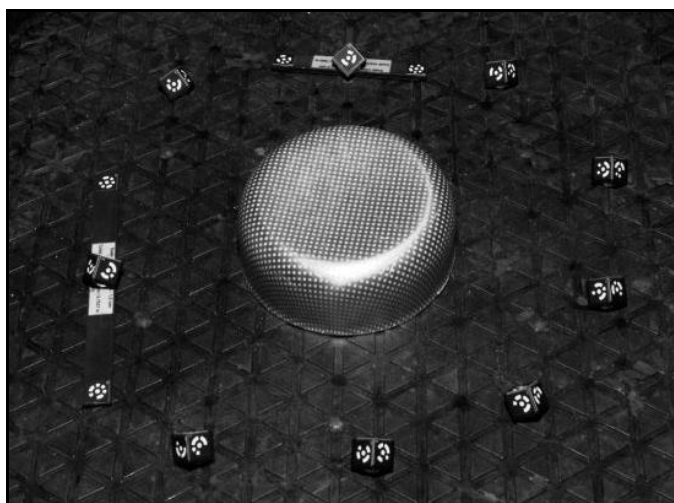


**Obr. 3.31 - Cípatost (vzorek 164,8)**

Jak již bylo zmíněno výše, cípatost je patrnější, čím větší kruhový vzorek byl pro tažení použit, neboli čím větší byla výška kelímku po vytažení. Pro vzorek o průměru 119,6 mm byl rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším okrajem 1,12 mm, pro vzorek o průměru 139,2 mm to bylo 1,88 mm a pro největší vzorek o průměru 164,8 mm byl rozdíl již 4,74 mm.

#### Analýza deformace pomocí optického systému Argus

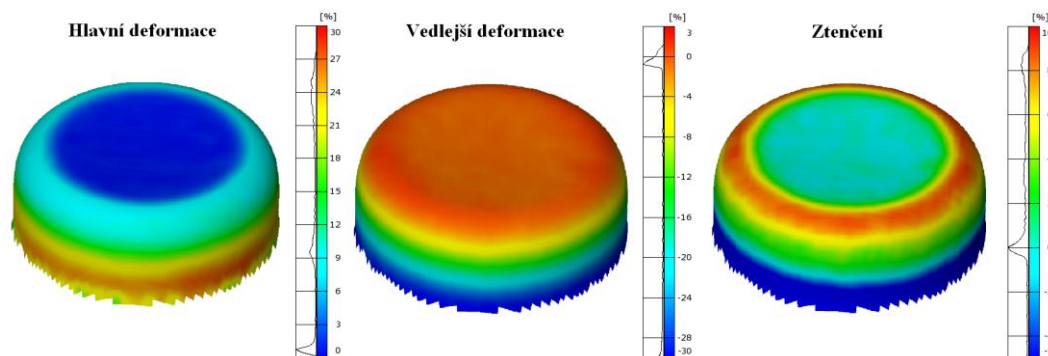
Poslední částí při vyhodnocování kalíškové zkoušky bylo analyzování deformace kelímku pomocí systému Argus. Přednost tohoto optického systému je v tom, že není třeba proces lisování (tažení kalíšku), při kterém dochází k deformaci, snímat kontinuálně. Stačí snímat stav před lisováním a stav po lisování. Pro snímání stavů před a po lisování byl použit digitální fotoaparát Nikon D2X. Před samotným snímáním bylo ještě nutné okolo vzorků vhodně rozmístit kalibrační kameny. Nejprve byl snímán stav před lisováním. K tomu posloužil nezdeformovaný vzorek, na kterém byla bodová deformační síť nanesená jen zčásti. Poté následovalo snímání zbylých zdeformovaných vzorků (kalíšků), které charakterizovaly stav po lisování.



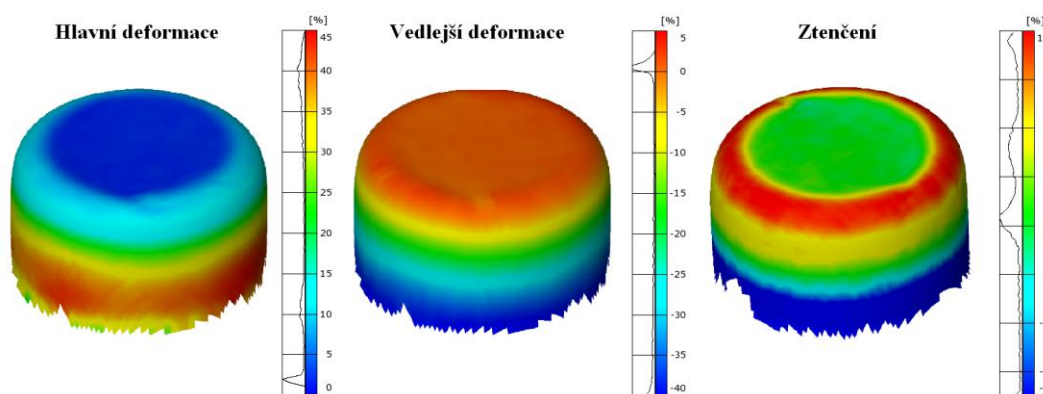
**Obr. 3.32 - Snímání kalíšku pomocí optického systému Argus**

Zaznamenaná data byla potom přesunuta do počítače a pomocí softwaru systému Argus proběhlo vyhodnocení. Na následujících snímcích jsou vyobrazeny jednotlivé kalíšky, které byly vytaženy z kruhových polotovárů o průměrech 119,6; 139,2 a 164,8 mm. Na těchto snímcích jsou také vidět barevné mapy hlavních, vedlejších deformací a ztenčení pro jednotlivé kelímky.

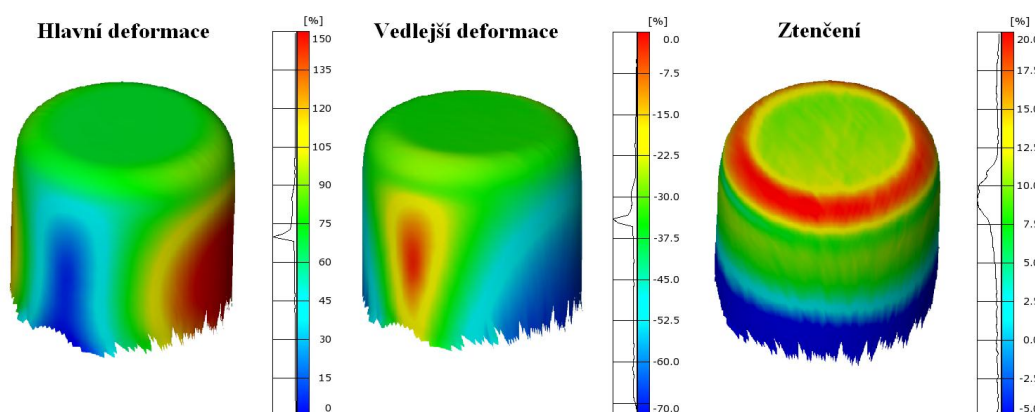




Obr. 3.33 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení (vzorek 119,6)



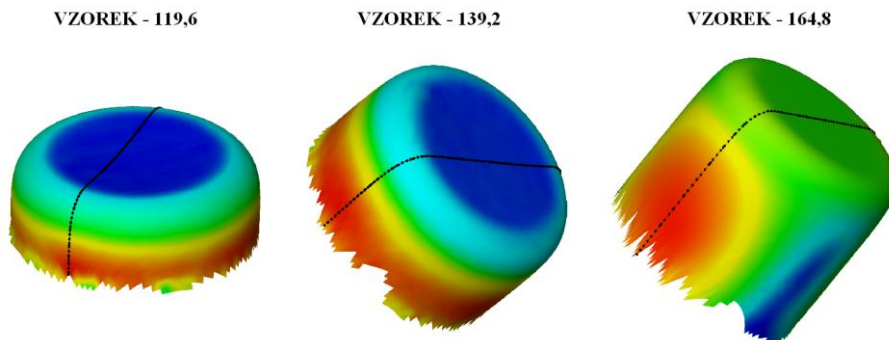
Obr. 3.34 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení (vzorek 139,2)



Obr. 3.35 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení (vzorek 164,8)

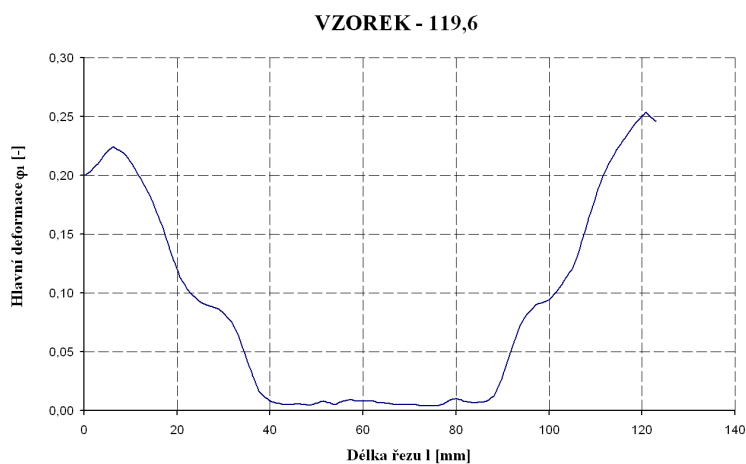
Na obrázku (obr. 3.35), který náleží vzorku 164,8, je u barevné mapy hlavní a vedlejší deformace nejvíce patrné rozdílné chování materiálu ve směru  $0^\circ$  a ve směru  $90^\circ$ .

Dále byl veden pomocí měřicího softwaru přes kalíšek řez. Tento řez procházel přes místo s největší hlavní deformací (viz. obrázek 3.36).

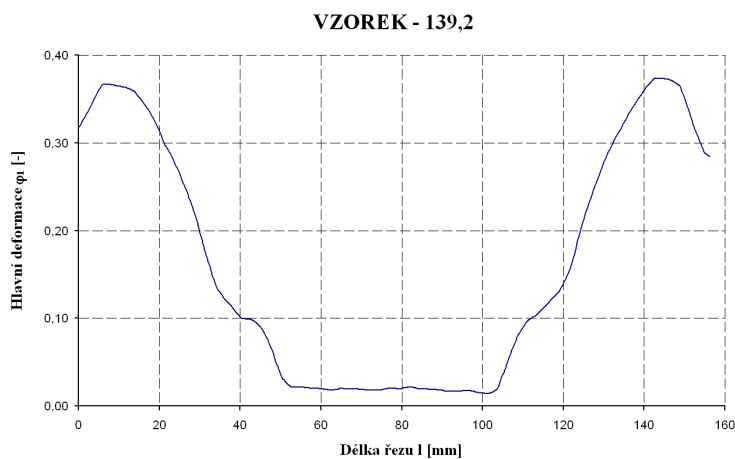


**Obr. 3.36 - Ukázka řezů vedených přes kalíšky**

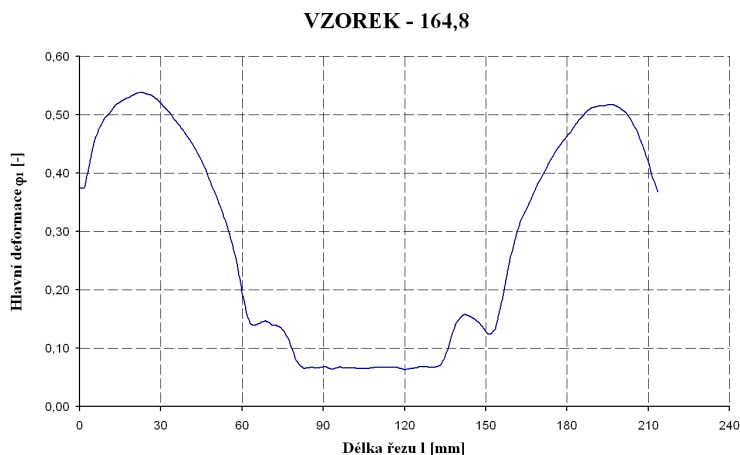
Z těchto řezů byly poté zjištěny hodnoty hlavní deformace, které se nacházely v jednotlivých úsecích řezů. Z těchto zjištěných hodnot mohla být sestavena závislost hlavní deformace na délce řezu.



**Obr. 3.37 - Průběh hlavní deformace (vzorek 119,6)**



**Obr. 3.38 - Průběh hlavní deformace (vzorek 139,2)**



Obr. 3.39 - Průběh hlavní deformace (vzorek 164,8)

### 3.5 Numerická simulace pomocí programu PAM-STAMP 2G

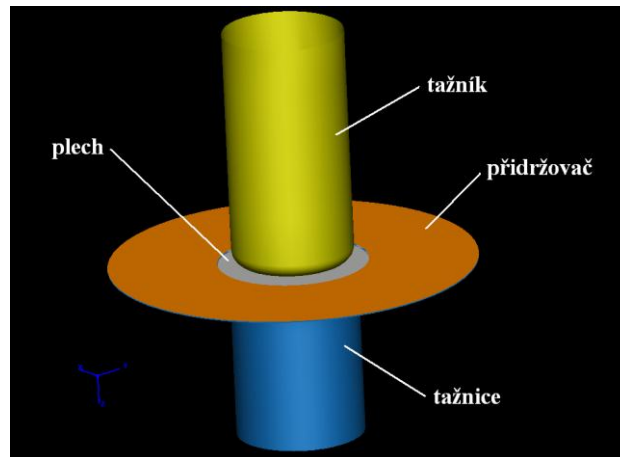
Poslední fází experimentální části této diplomové práce bylo provedení numerické simulace kalíškové zkoušky (procesu tažení kelímku) v programu PAM-STAMP 2G. V tomto programu byla zkouška simulována za využití dvou výpočtových modelů: výpočtový model Hill 48 a výpočtový model Vegter. Výsledky numerické simulace bylo poté možné porovnat s daty, které byly naměřeny při reálném laboratorním experimentu.

#### 3.5.1 Přípravná fáze

Pro vlastní simulaci procesu bylo nejprve potřebné vytvořit geometrii tažníku a tažnice. Správná geometrie nástroje byla vymodelována v programu CATIA. Modely tažníku a tažnice byly následně exportovány do formátu IGS. Ostatní části nástroje a přístřih plechu byl vytvořen v pre-procesoru programu PAM-STAMP 2G.

Dalším důležitým bodem v přípravě simulace bylo charakterizovat materiál plechu a jeho vlastnosti. Pro popis materiálu posloužily výsledky, které byly získány ze statické zkoušky tahem. Pro definování materiálu plechu bylo třeba zjistit: modul monotónního zpevnění, exponent deformačního zpevnění, ofsetovou deformaci, hustotu materiálu, tloušťku plechu, Youngův modul pružnosti, Poissonovu konstantu, mez kluzu, součinitel normálové anizotropie, směr válcování.

Pro úspěšné provedení simulace bylo také nutné popsat samotný lisovací proces. Bylo zapotřebí definovat koeficient tření mezi nástroji a přístřihem, přítlačnou sílu přidržovače a správný pohyb včetně vzájemné pozice nástrojů při lisování (tedy kinematiku lisovacího procesu).



Obr. 3.40 - Připravený nástroj před simulací v programu PAM-STAMP 2G

### 3.5.2 Model HILL 48

Při numerické simulaci s užitím modelu dle Hilla 48 byla nejprve použita hrubší síť nástrojů i plechu (5 mm). U plechu bylo v tomto případě využito adaptivního síťování. Vyhodnocení simulace s touto hrubší sítí je vypracováno v následující kapitole (viz. kap. 3.5.2.1).

Poté byla simulace s modelem podle Hilla 48 prováděna ještě s jemnou sítí nástrojů i plechu (1 mm). U plechu bylo v tomto případě počítáno s jemným síťováním již od začátku simulace. Výsledky simulace s touto jemnou sítí byly pak využity při vyhodnocování výsledků (viz. kap. 4).

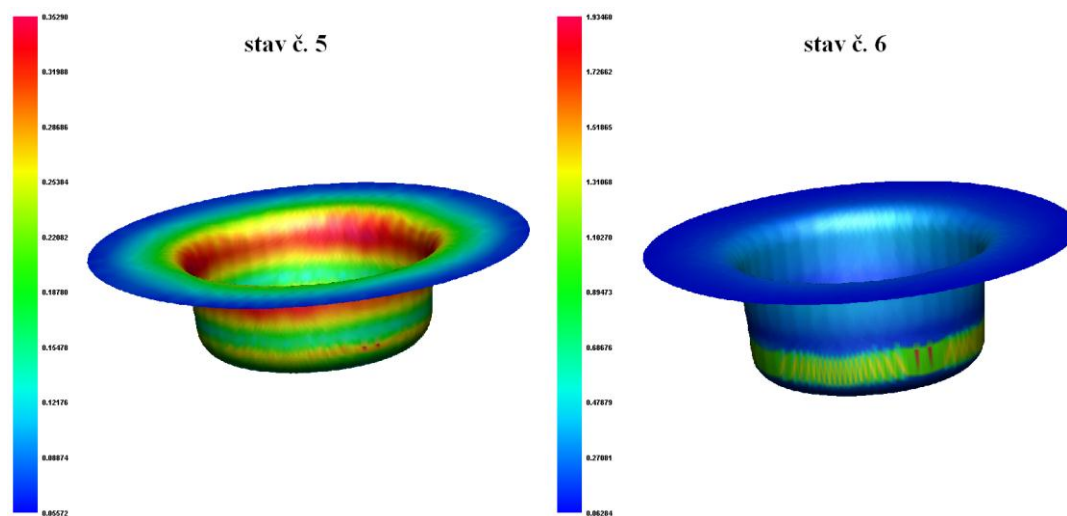
Před samotnou numerickou simulací procesu tažení s modelem podle Hilla 48 bylo nejdříve potřeba v programu PAM-STAMP 2G charakterizovat zkoumaný materiál AlMg3. Pro tento starší výpočtový model byly brány střední hodnoty zprůměrovaného modulu monotónního zpevnění, exponentu deformačního zpevnění, zprůměrované ofsetové deformace a výsledného koeficientu normálové anizotropie ze základních směrů 0°, 45° a 90°.

#### 3.5.2.1 Vyhodnocení numerické simulace (model HILL 48)

##### Ukázka nekorektního výsledku simulace

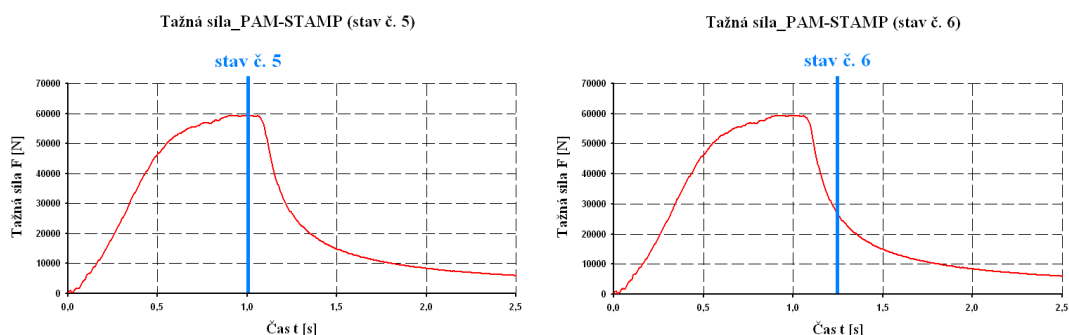
Při numerickém simulování procesu tažení kelímku modelem dle Hilla 48 bylo tedy nejdříve počítáno s hrubou sítí nástrojů i plechu 5 mm (u plechu bylo použito adaptivního síťování). Při numerické simulaci s touto hrubou sítí byla snaha v nastavení procesu zadávat takový koeficient tření, při kterém by se průběh hlavní deformace co nejvíce blížil reálným výsledkům zjištěným pomocí optického systému Argus. Při použití tohoto hrubého síťování bylo zjištěno, že koeficient tření má velký vliv na korektnost výpočtu. Maximální hodnota koeficientu tření, při kterém výpočet ještě proběhl korektně a průběh hlavní deformace se nejvíce blížil reálným hodnotám, byla 0,0225. Při

nastavení větší hodnoty koeficientu tření neproběhl numerický výpočet korektně, elementy materiálu (kelímku) se začaly bortit a došlo k utržení (obr. 3.41).



**Obr. 3.41 - Ukázka porušení kelímku (obr. vlevo: stav před porušením, obr. vpravo: stav při porušení)**

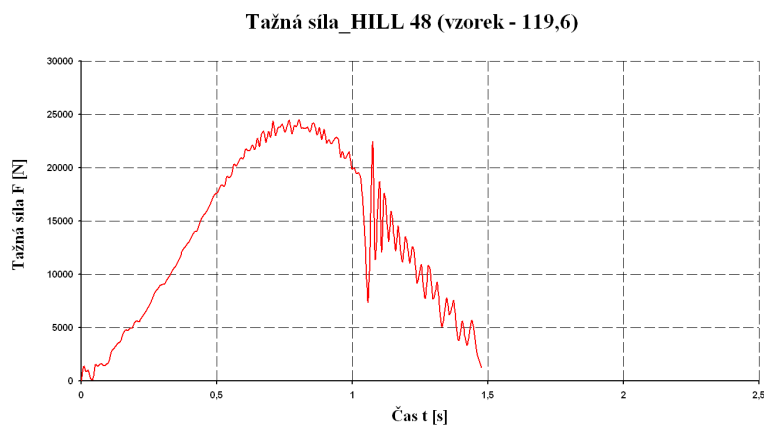
Tento nekorektní výpočet je ukázán na největším přístřihu plechu o průměru 164,8 mm. Na předchozím obrázku jsou ukázány dva stavy: stav před vznikem porušení (stav č. 5) a stav při porušení kelímku (stav č. 6). Stav č. 5 odpovídá stavu, kdy tažník sjel o 36 mm. Při sjetí tažníku o dalších 8 mm (stav č. 6) bylo již patrné utržení kelímku. Nesprávnost výpočtu je také zřejmá z velikosti hlavní deformace, která narůstá do nesmyslných hodnot. Nekorektní simulace ovlivňuje také průběh tažné síly (viz. následující obrázek 3.42).



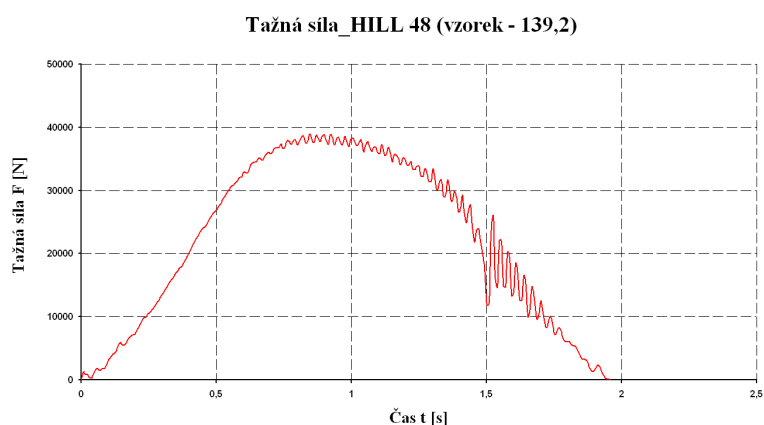
**Obr. 3.42 - Průběh tažné síly při nekorektním numerickém výpočtu**

### Tažná síla

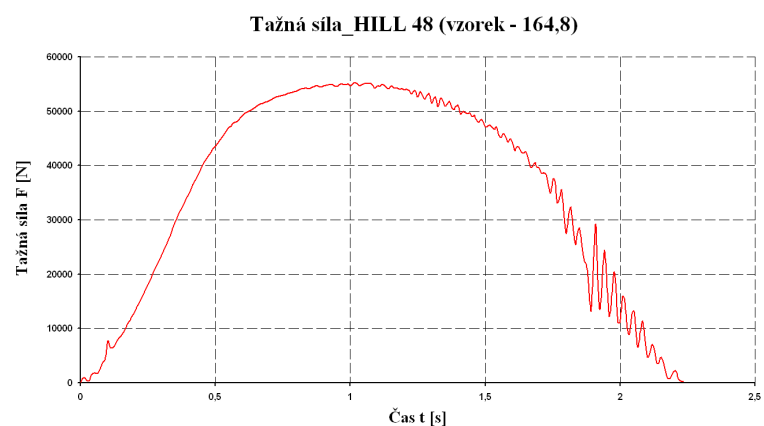
Průběhy tažné síly pro jednotlivé kategorie vzorků po provedené simulaci s uplatněným modelem dle Hilla 48 v programu PAM-STAMP 2G jsou znázorněny v následujících grafech.



**Obr. 3.43 - Průběh tažné síly-model Hill 48 (vzorek 119,6)**



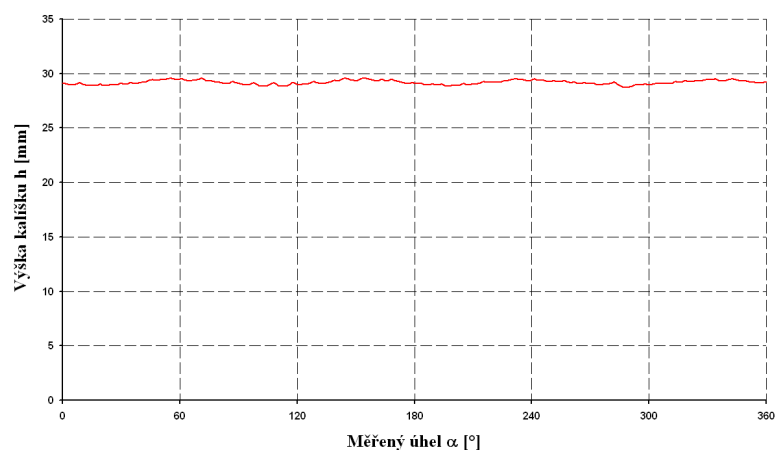
**Obr. 3.44 - Průběh tažné síly-model Hill 48 (vzorek 139,2)**



**Obr. 3.45 - Průběh tažné síly-model Hill 48 (vzorek 164,8)**

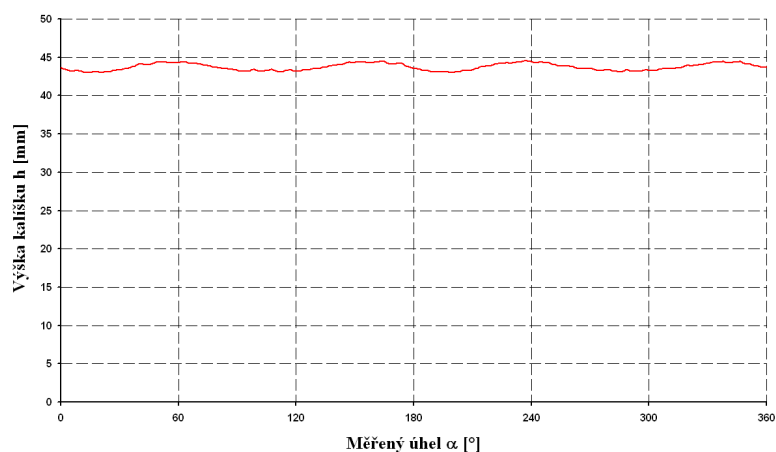
## Cípatost

**Cípatost\_HILL 48 (vzorek - 119,6)**



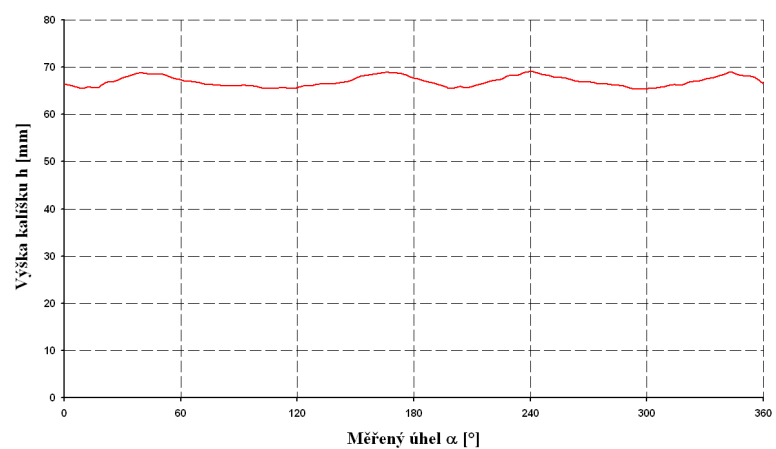
**Obr. 3.46 - Cípatost-model Hill 48 (vzorek 119,6)**

**Cípatost\_HILL 48 (vzorek - 139,2)**



**Obr. 3.47 - Cípatost-model Hill 48 (vzorek 139,2)**

**Cípatost\_HILL 48 (vzorek - 164,8)**



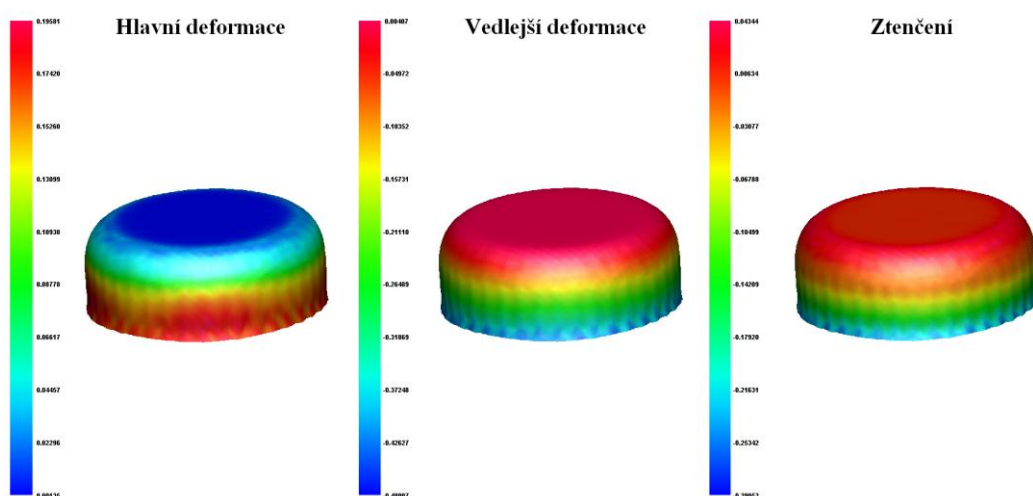
**Obr. 3.48 - Cípatost-model Hill 48 (vzorek 164,8)**



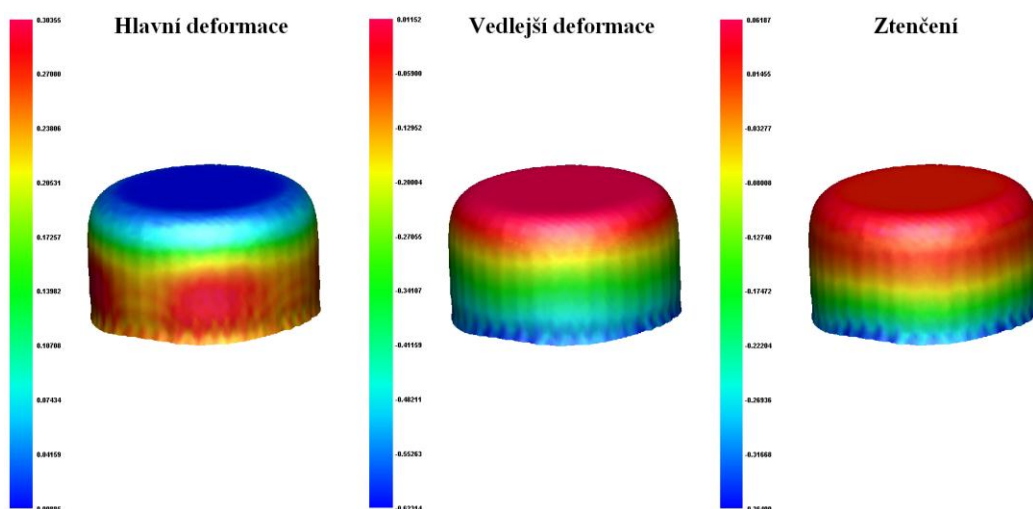
Po dokončení simulace procesu tažení v programu PAM-STAMP 2G (model Hill 48) byla cípatost opět patrnější, čím větší byla výška kalíšku po vytažení. Pro vzorek o průměru 119,6 mm byl rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším okrajem 0,84 mm, pro vzorek o průměru 139,2 mm to bylo 1,55 mm a pro největší vzorek o průměru 164,8 mm byl rozdíl již 3,61 mm.

### Analýza deformace

Na následujících obrázcích jsou znázorněny barevné mapy hlavních, vedlejších deformací a ztenčení pro jednotlivé kategorie kelímků po dokončení simulace v programu PAM-STAMP 2G s využitím modelu dle Hilla 48.

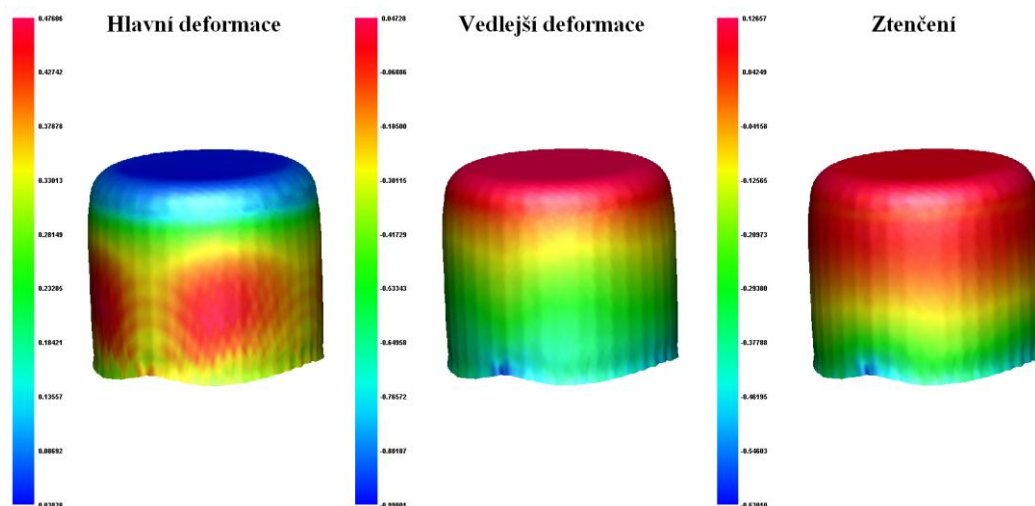


**Obr. 3.49 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Hill 48 (vzorek 119,6)**



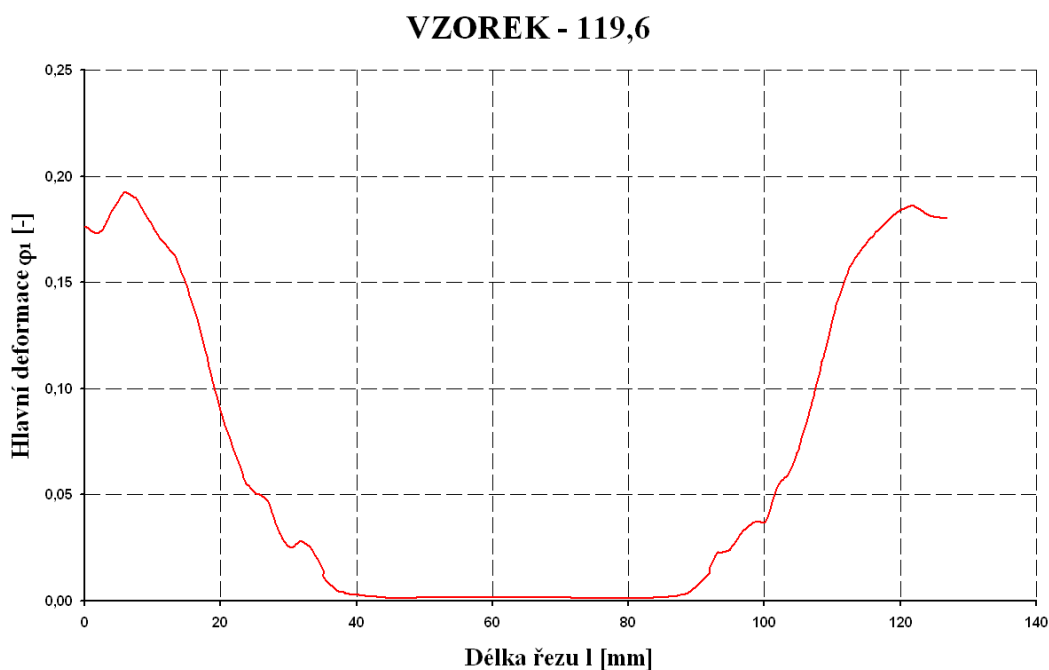
**Obr. 3.50 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Hill 48 (vzorek 139,2)**





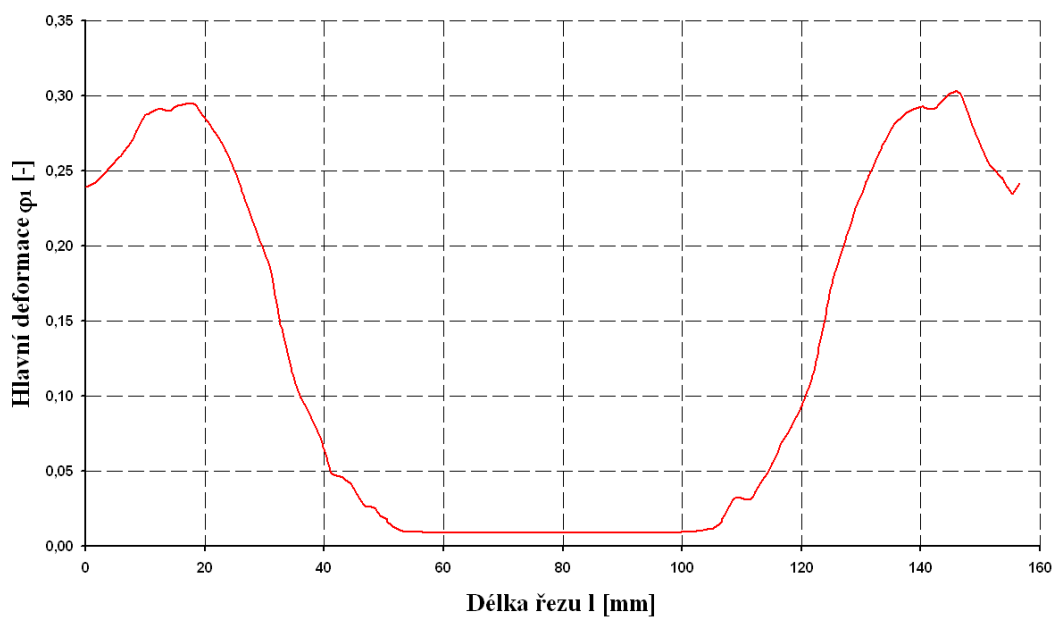
**Obr. 3.51 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Hill 48 (vzorek 164,8)**

V programu PAM-STAMP 2G byly potom přes kalíšky opět vedeny řezy. Z těchto řezů byly zjištěny hodnoty hlavní deformace, které se nacházely v jednotlivých úsecích řezů. Následně byla poté opět vytvořena závislost hlavní deformace na délce řezu.



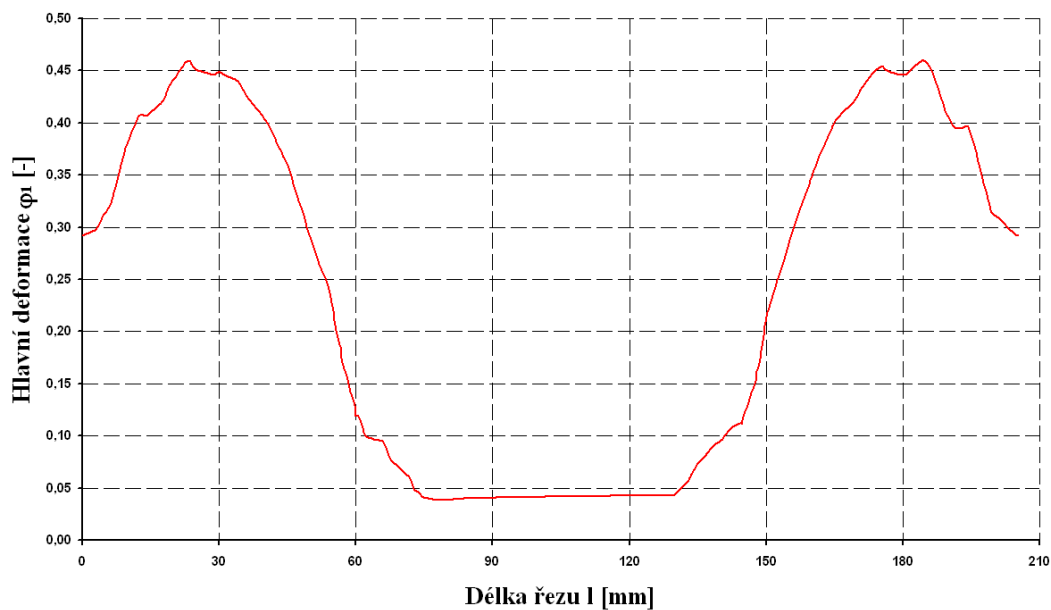
**Obr. 3.52 - Průběh hlavní deformace-model Hill 48 (vzorek 119,6)**

### VZOREK - 139,2



Obr. 3.53 - Průběh hlavní deformace-model Hill 48 (vzorek 139,2)

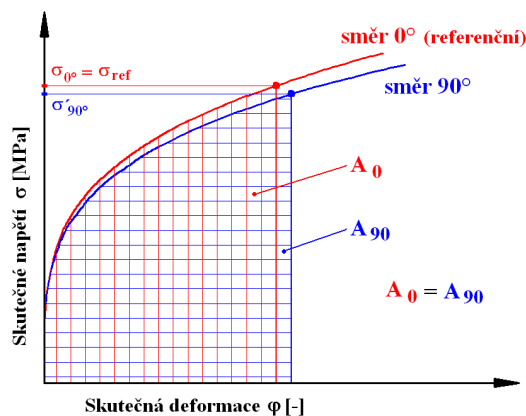
### VZOREK - 164,8



Obr. 3.54 - Průběh hlavní deformace-model Hill 48 (vzorek 164,8)

### 3.5.3 Model VEGTER

Před samotnou numerickou simulací procesu bylo nejprve nutné model dle Vegtera nadefinovat a v programu PAM-STAMP 2G vytvořit pro zkoumaný materiál AlMg3 materiálovou kartu s ohledem na tento model. Pro definování modelu dle Vegtera byly využity aproximované skutečné diagramy z tahové zkoušky pro všechny směry ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ) a závislost intenzity napětí na intenzitě deformace z hydraulické zkoušky vyboulování. Bylo tedy získáno osm křivek, na kterých nyní byly spočítány napěťové poměry. Aproximovaná křivka pro směr  $0^\circ$  byla brána jako referenční a ostatní křivky byly k této základní křivce vztahovány. Princip tvorby napěťových poměrů spočíval v nalezení libovolného bodu na referenční křivce (směr  $0^\circ$ )  $\sigma_{\text{ref}}$ , dále spočítání plochy pod touto křivkou (práce)  $A_0$  a hledání stejné plochy (práce) na jiné křivce. Na následujícím obrázku je ukázán princip tvorby napěťových poměrů (ukázka pro směr  $90^\circ$ ).



Obr. 3.55 - Tvorba napěťových poměrů

Byly tedy získány dvě hodnoty napětí  $\sigma_{\text{ref}}$  a  $\sigma'_{90^\circ}$  (pro ukázkou je brán směr  $90^\circ$ ). Z těchto dvou hodnot byl pak vytvořen napěťový poměr:

$$\sigma_{90^\circ} = \frac{\sigma'_{90^\circ}}{\sigma_{\text{ref}}} [-] \quad (50)$$

kde:  $\sigma_{\text{ref}}$  - skutečné napětí na referenční křivce (směr  $0^\circ$ )  
 $\sigma'_{90^\circ}$  - skutečné napětí na křivce pro směr  $90^\circ$

Pro větší přesnost byly napěťové poměry počítány i v jiných bodech na křivce. V předchozích řádcích byla nastíněna tvorba napěťového poměru pro směr  $90^\circ$ . Pro potřeby modelu podle Vegtera bylo nutné získat napěťové poměry také na křivkách v ostatních zbývajících směrech, včetně křivky zjištěné z hydraulické zkoušky vyboulování. Všechny získané hodnoty

napětových poměrů byly poté zapsány do materiálové karty v programu PAM-STAMP 2G.

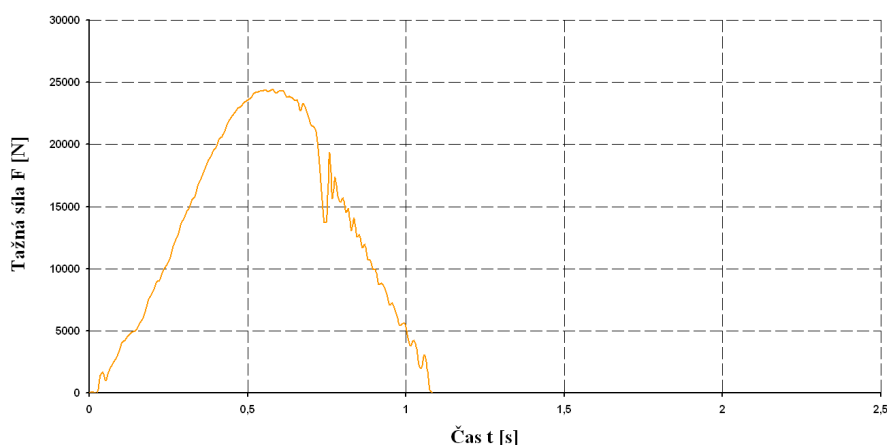
Při numerické simulaci s užitím modelu dle Vegtera byla použita jemná síť nástrojů (1 mm). U plechu bylo také využito stejného jemného síťování, ale oproti modelu dle Hilla 48 bylo s jemnou sítí počítáno již od začátku simulace.

### 3.5.3.1 Vyhodnocení numerické simulace (model VEGTER)

#### Tažná síla

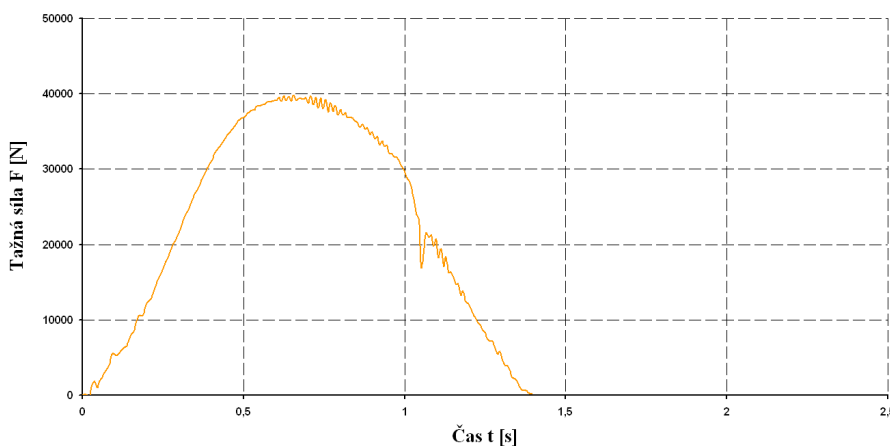
Průběhy tažné síly pro jednotlivé kategorie vzorků po provedené simulaci s uplatněním modelu dle Vegtera v programu PAM-STAMP 2G jsou ukázány v následujících grafech.

Tažná síla\_VEGTER (vzorek - 119,6)



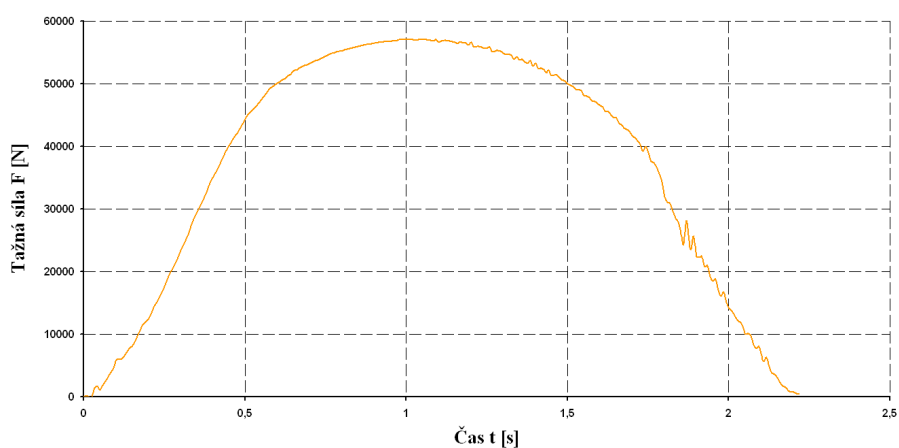
Obr. 3.56 - Průběh tažné síly-model Vegter (vzorek 119,6)

Tažná síla\_VEGTER (vzorek - 139,2)



Obr. 3.57 - Průběh tažné síly-model Vegter (vzorek 139,2)

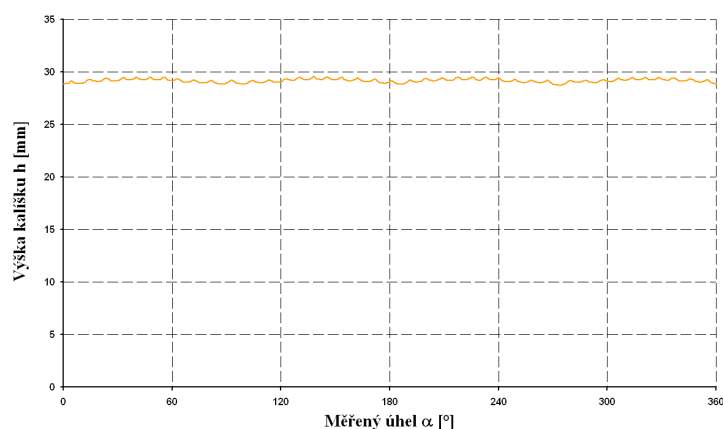
**Tažná síla\_VEGTER (vzorek - 164,8)**



**Obr. 3.58 - Průběh tažné síly-model Vegter (vzorek 164,8)**

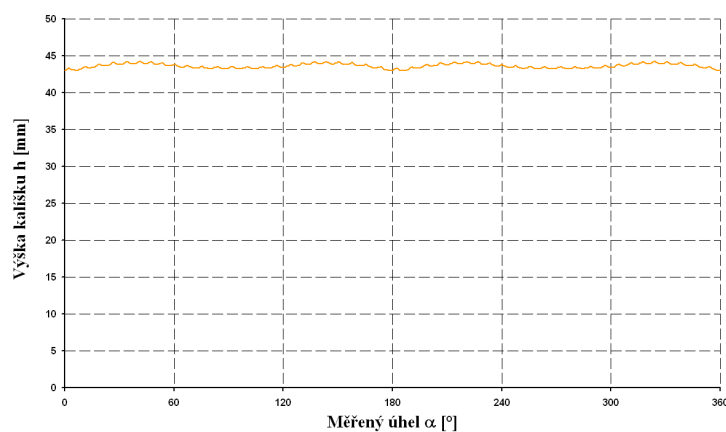
### Cípatost

**Cípatost\_VEGTER (vzorek - 119,6)**

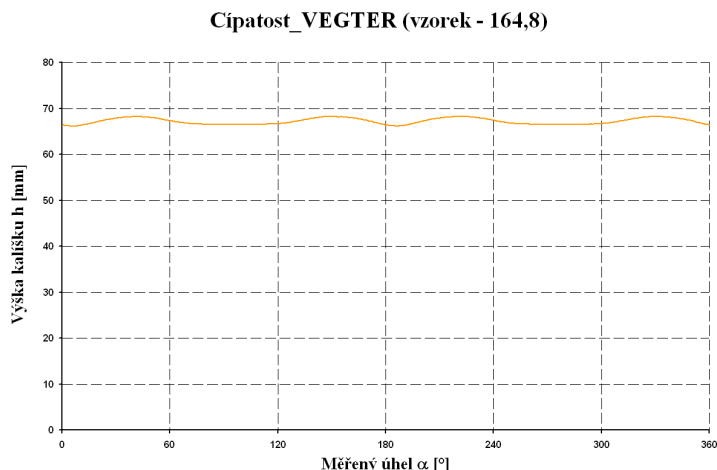


**Obr. 3.59 - Cípatost-model Vegter (vzorek 119,6)**

**Cípatost\_VEGTER (vzorek - 139,2)**



**Obr. 3.60 - Cípatost-model Vegter (vzorek 139,2)**

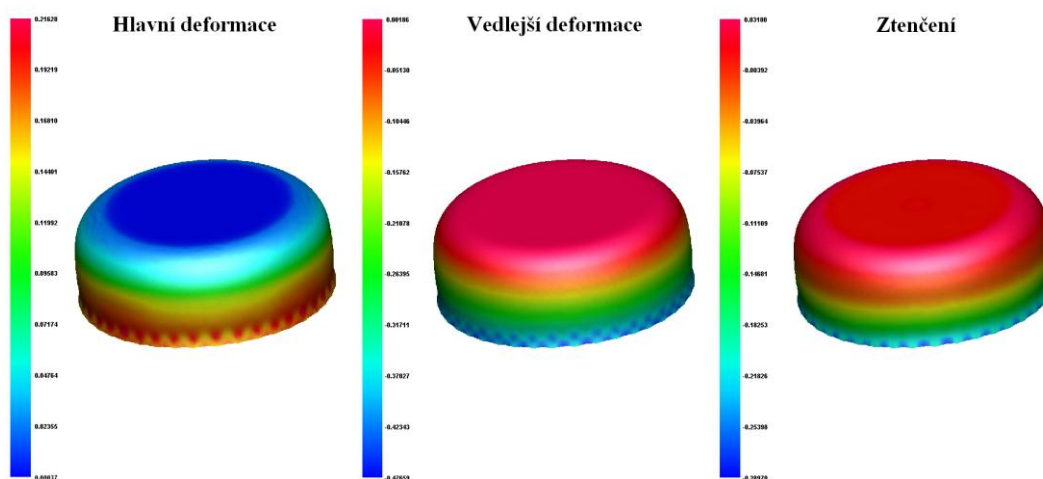


**Obr. 3.61 - Cípatost-model Vegter (vzorek 164,8)**

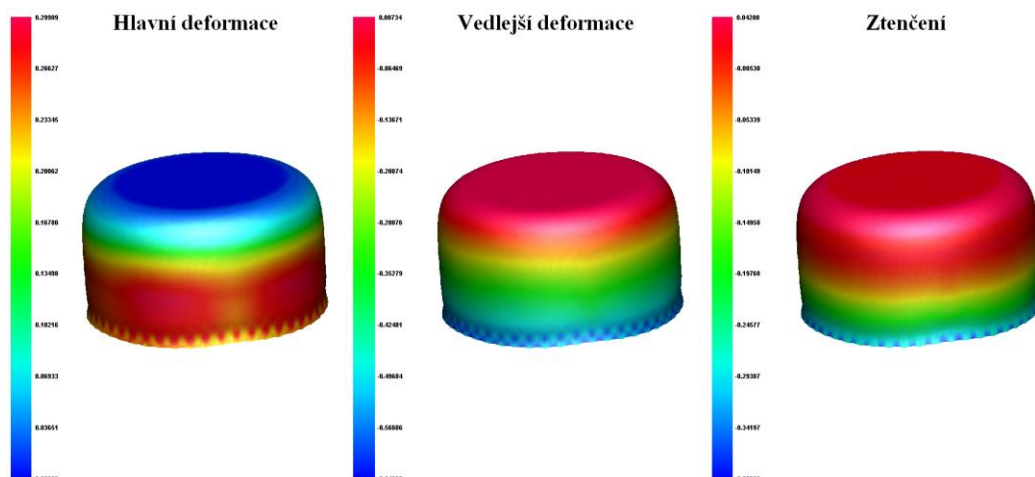
U vzorku o průměru 119,6 mm byl rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším okrajem kelímku 0,79 mm, pro vzorek o průměru 139,2 mm to bylo 1,26 mm a pro největší vzorek o průměru 164,8 mm byl rozdíl 2,1 mm.

### Analýza deformace

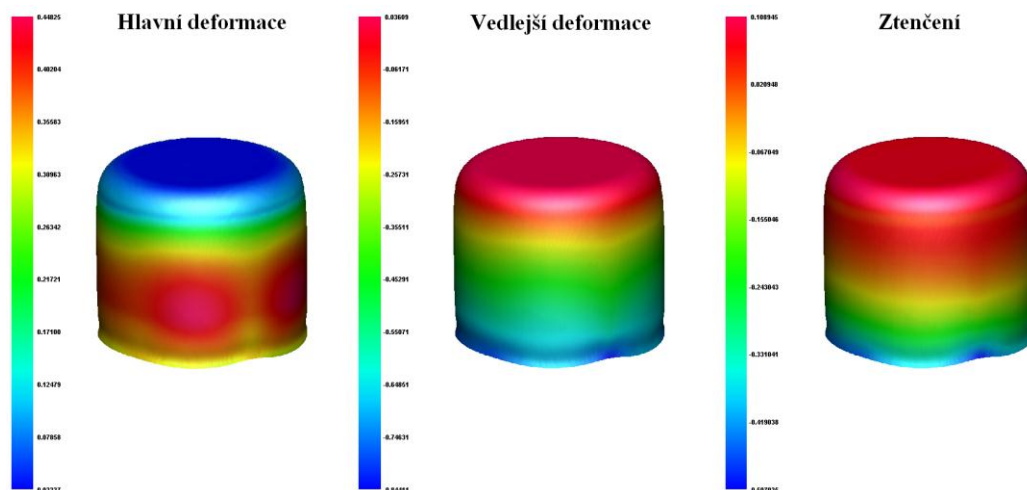
Na následujících obrázcích jsou ukázány barevné mapy hlavních, vedlejších deformací a ztenčení pro jednotlivé kategorie kelímků po dokončení simulace v programu PAM-STAMP 2G s užitím Vegterova modelu.



**Obr. 3.62 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Vegter (vzorek 119,6)**



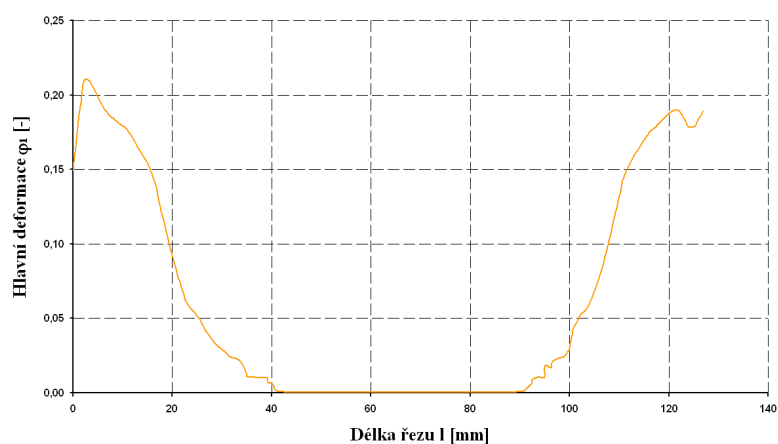
**Obr. 3.63 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Vegter (vzorek 139,2)**



**Obr. 3.64 - Hlavní, vedlejší deformace a ztenčení po numerické simulaci - model Vegter (vzorek 164,8)**

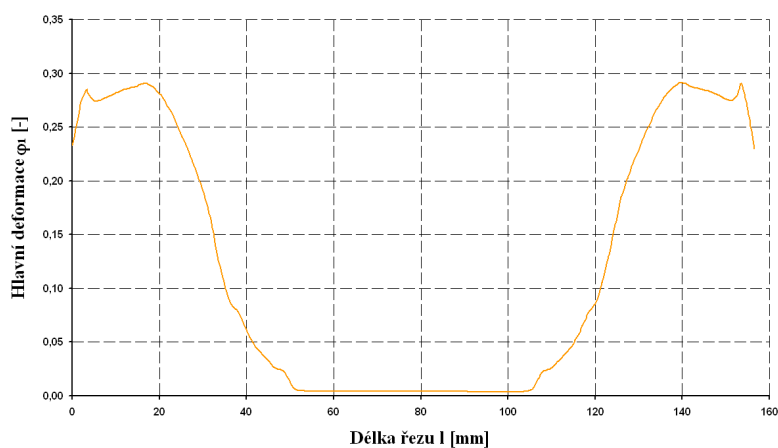
V programu PAM-STAMP 2G byly potom kalíšky opět říznuty přes místa, kde byly zjištěny nejvyšší hodnoty hlavní deformace. Z těchto řezů byly zpracovány hodnoty hlavní deformace, které se nacházely v jednotlivých úsecích řezů. Následně byla poté opět vytvořena závislost hlavní deformace na délce řezu.

VZOREK - 119,6



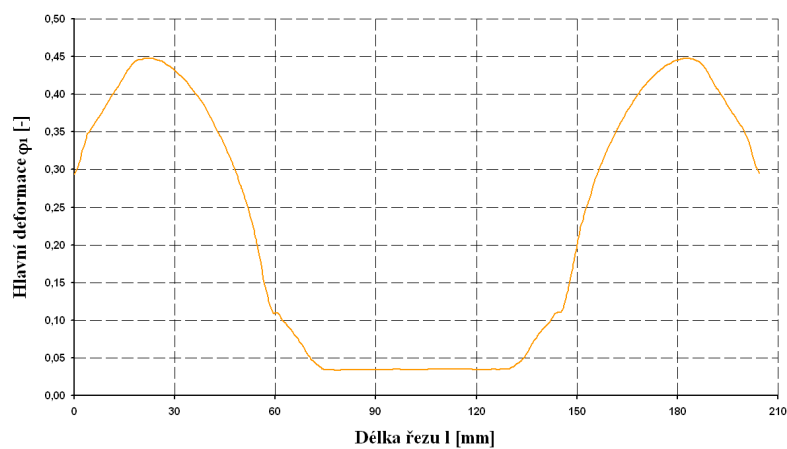
Obr. 3.65 - Průběh hlavní deformace-model Vegter (vzorek 119,6)

VZOREK - 139,2



Obr. 3.66 - Průběh hlavní deformace-model Vegter (vzorek 139,2)

VZOREK - 164,8



Obr. 3.67 - Průběh hlavní deformace-model Vegter (vzorek 164,8)

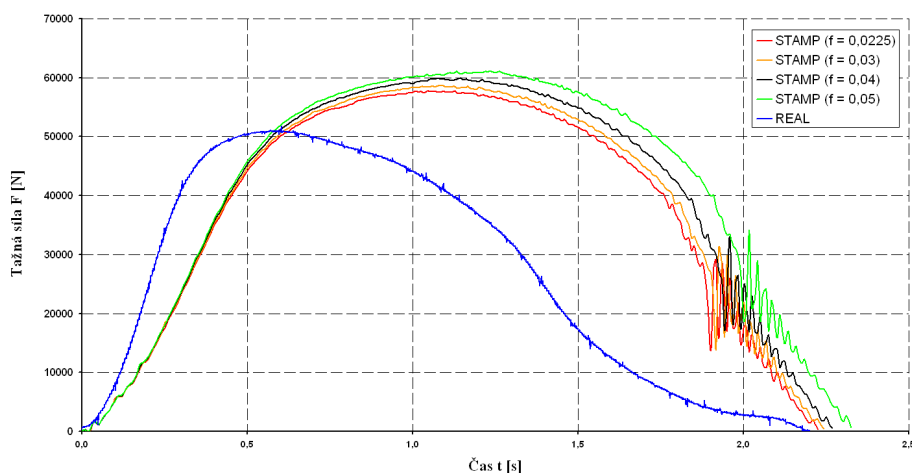


## 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

### 4.1 Model HILL 48 - srovnání numerických a reálných výsledků

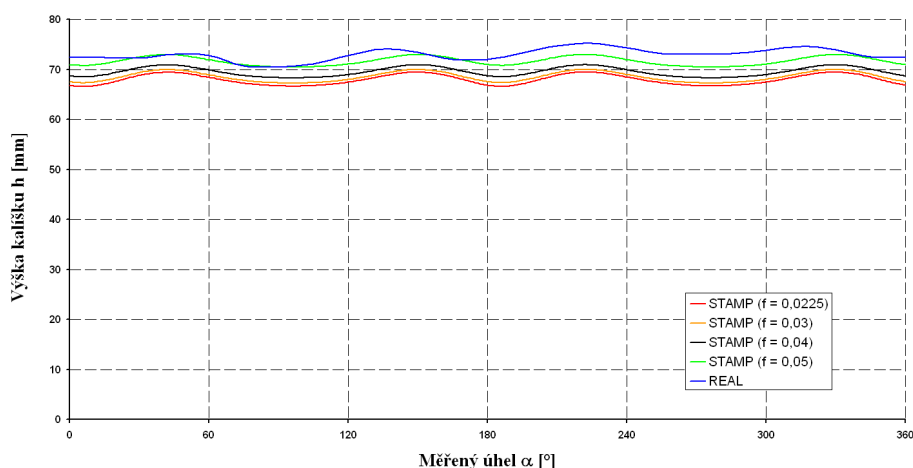
Tato část vyhodnocení se zabývá porovnáním výsledků numerické simulace (model Hill 48) s výsledky, které byly zjištěny z reálného experimentu. V tomto případě byla numerická simulace počítána již s jemnou sítí nástrojů i plechu 1 mm (u plechu bylo pracováno s jemnou sítí od začátku simulace). V rámci tohoto vyhodnocení byly srovnávány průběhy tažných sil, cípatost a průběhy hlavní deformace. Výsledky jsou vztaženy k největšímu přístřihu plechu o průměru 164,8 mm.

Porovnání tažných sil (model HILL 48)



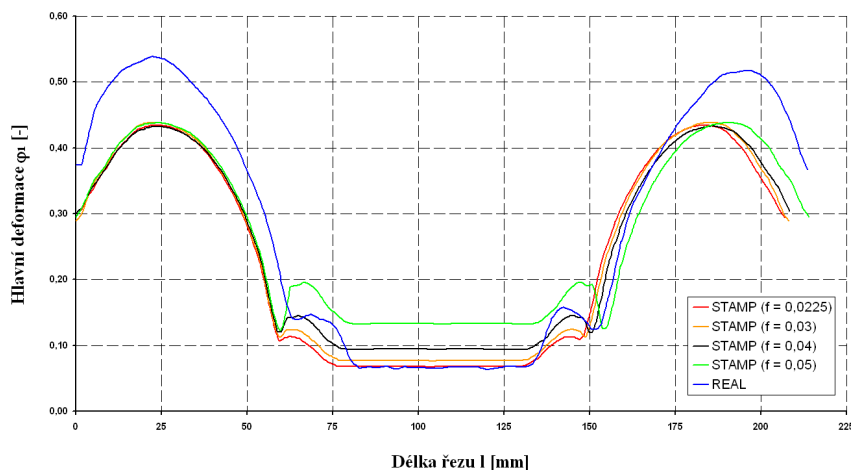
Obr. 3.68 - Srovnání tažných sil

Porovnání cípatosti (model HILL 48)



Obr. 3.69 - Srovnání cípatosti

Porovnání průběhů hlavní deformace (model HILL 48)

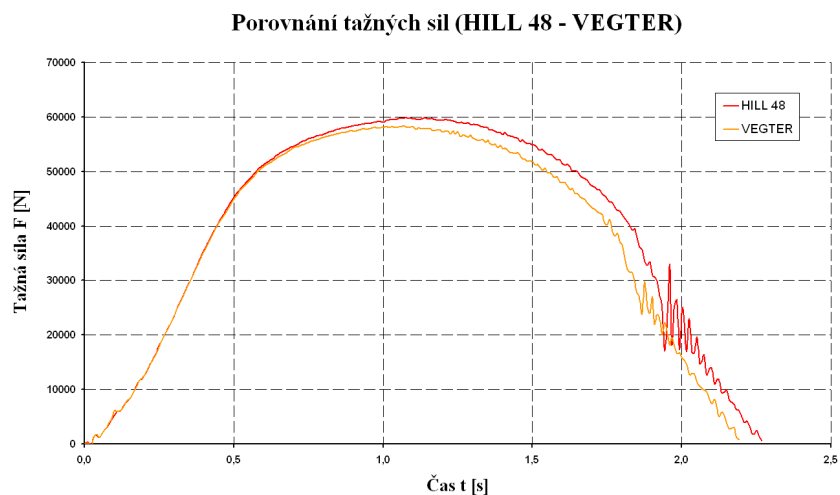


Obr. 3.70 - Srovnání průběhů hlavní deformace

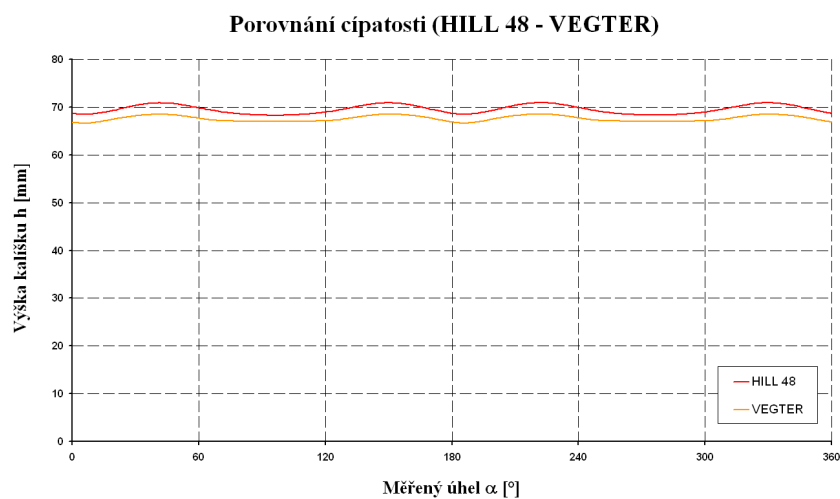
Z předchozích tří grafů je patrné, že výsledky z experimentu jsou porovnávány se čtyřmi výsledky z numerické simulace. Výsledky z numerické simulace se mezi sebou odlišovaly v použití různých hodnot koeficientu tření. Byly použity tyto hodnoty koeficientu tření: 0,0225; 0,03; 0,04 a 0,05. Takže oproti předchozímu případu, kdy byla použita hrubá síť, bylo možno provést simulaci i s vyššími hodnotami tření. Díky jemnému síťování bylo tedy možno realizovat numerický výpočet i s většími součiniteli tření. Z toho plyne, že pokud je u modelu použito jemné síťování, tak tření nemá výrazný vliv na výsledky numerické simulace a na korektnost výpočtu. Při použití jemné sítě došlo k utržení kelímku až při tření 0,07.

#### 4.2 Model HILL 48 a VEGTER - porovnání výsledků

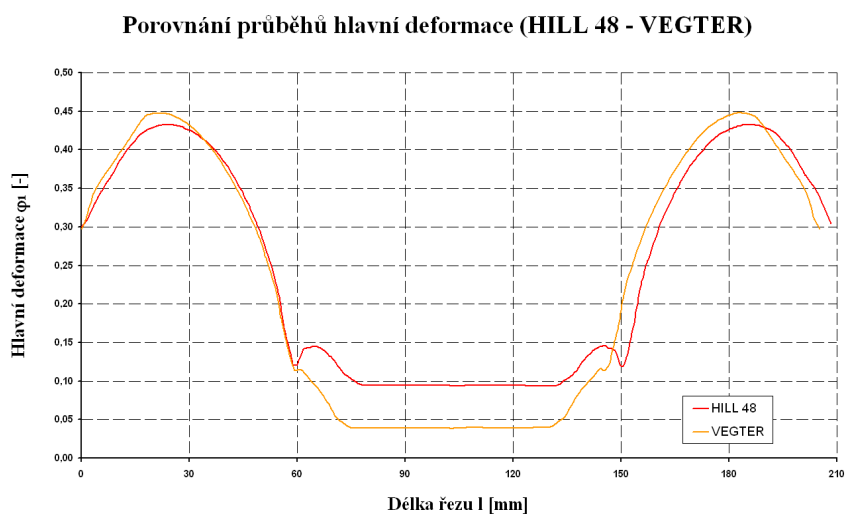
Zde jsou porovnány průběhy tažných sil, cípatost a průběhy hlavní deformace mezi modely dle Hilla 48 a dle Vegtera. U obou modelů je užito jemného síťování nástrojů i plechu. Díky jemné síti sice výpočet trvá déle, ale je přesnější. Simulace byly počítány s koeficientem tření o hodnotě 0,04. Opět brán největší kruhový přístřih plechu 164,8 mm.



**Obr. 3.71 - Srovnání tažných sil (Hill 48 x Vegter)**



**Obr. 3.72 - Srovnání cípatosti (Hill 48 x Vegter)**



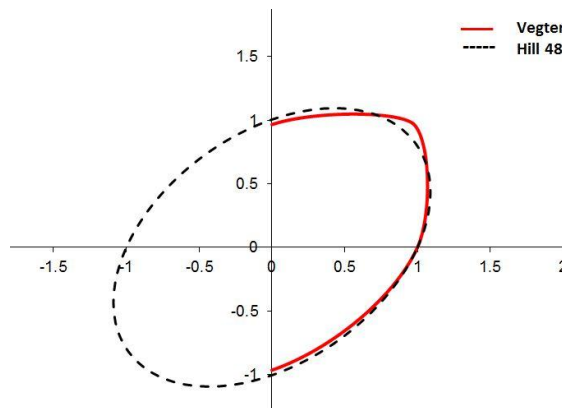
**Obr. 3.73 - Srovnání průběhů hlavní deformace (Hill 48 x Vegter)**

Z průběhu tažných sil vyplývá, že model Hill 48 průběh tažné síly trochu nadhodnocuje oproti modelu dle Vegtera. Při porovnání s reálnou tažnou silou se průběh tažné síly při použití Vegterova modelu více blíží reálnému průběhu, než u modelu podle Hilla 48. Model dle Vegtera je přesnější a více se blíží skutečným hodnotám.

U srovnání cípatosti model Vegter znázorňuje „uší“ s menší amplitudou. Model Hill 48 pro slitiny hliníku cípatost nadhodnocuje a „uší“ jsou o trochu patrnější. Ovšem ve srovnání s reálnými hodnotami není cípatost tolik patrná. Cípatost na skutečném výtažku je výraznější.

Při porovnání průběhů hlavní deformace plyne, že model Vegter je oproti modelu Hill 48 opět přesnější, protože se více přibližuje reálnému průběhu hlavní deformace, která byla zjištěna pomocí systému Argus.

#### 4.3 Model HILL 48 a VEGTER - porovnání podmínek plasticity

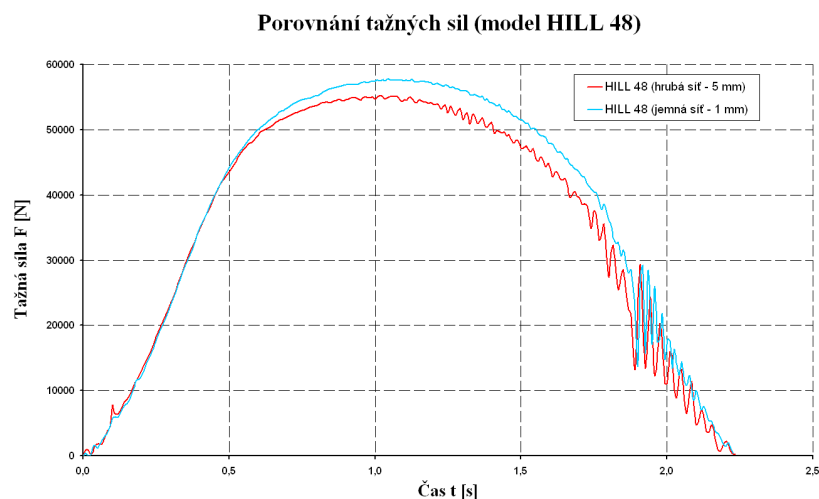


Obr. 3.74 - Podmínky plasticity

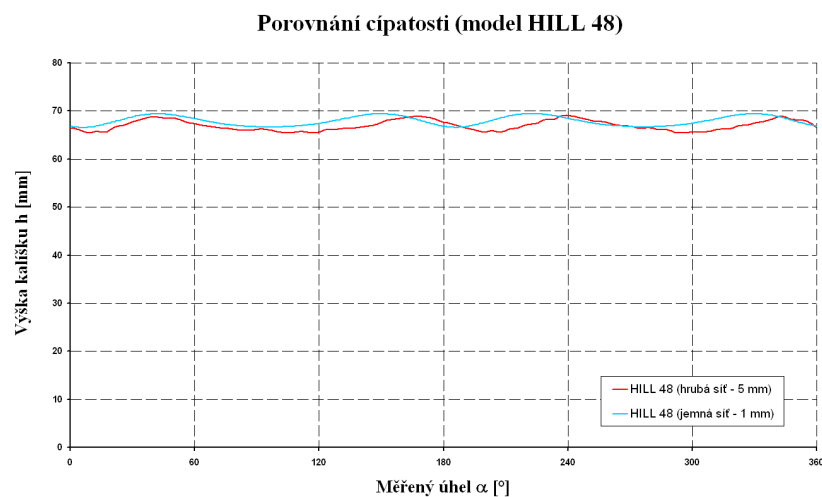
Z předchozího obrázku (obr. 3.74) vyplývá, že podmínky plasticity mezi oběma modely se nejvíce liší v oblasti dvouosé napjatosti. Ve stavu jednoosé napjatosti se obě podmínky plasticity od sebe výrazně neliší.

#### 4.4 Model HILL 48 - porovnání hrubé a jemné sítě

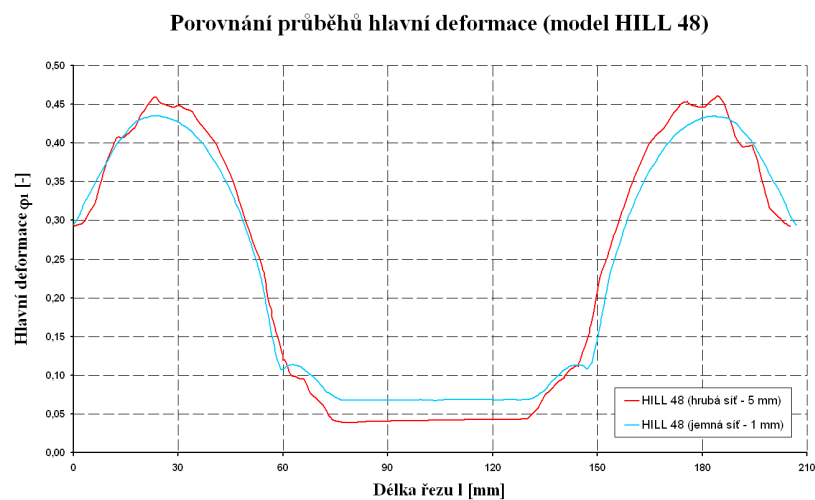
Toto vyhodnocení se zabývá srovnáním hrubého a jemného síťování při numerickém simulování procesu tažení s užitím modelu dle Hilla 48. Rozdíly mezi hrubou a jemnou sítí jsou opět zjišťovány na průbězích tažných sil, cípatosti a průbězích hlavní deformace. Koeficient tření byl u obou zvolen 0,0225, protože při použití většího tření by výpočet u hrubé sítě neproběhl korektně. Výsledky jsou opět vztaženy k největšímu přístřihu plechu o průměru 164,8 mm.



**Obr. 3.75 - Srovnání tažných sil-model Hill 48 (hrubá x jemná síť)**



**Obr. 3.76 - Srovnání cípatosti-model Hill 48 (hrubá x jemná síť)**



**Obr. 3.77 - Srovnání průběhů hl. deformace-model Hill 48 (hrubá x jemná síť)**

Z předchozích grafických závislostí je vidět, že k největší odlišnosti mezi hrubým a jemným síťováním dochází u průběhů tažných sil a u průběhů hlavní deformace. U cípatosti (velikost amplitud) tak velký rozdíl není. Dalším rozdílem je, že křivky jednotlivých průběhů nejsou u jemného síťování tolik kostrbaté a jsou vyhlazenější, než při použití hrubé sítě.

#### 4.5 Model HILL 48, VEGTER a reálný experiment - srovnání zjištěných hodnot

V této části vyhodnocení je porovnávána maximální hodnota tažné síly, cípatost a maximální hodnota hlavní deformace mezi reálným experimentem, modelem dle Hilla 48 a mezi modelem podle Vegtera. Hodnoty zapsané v následujících tabulkách jsou pro reálný experiment brány z kapitoly o vyhodnocení kalíškové zkoušky (kap. 3.4.3), pro model dle Hilla 48 jsou převzaty z kapitoly o vyhodnocení numerické simulace s modelem dle Hilla 48 (kap. 3.5.2.1) a pro model podle Vegtera jsou použity z kapitoly o vyhodnocení numerické simulace s modelem dle Vegtera (kap. 3.5.3.1). Hodnoty získané z reálného experimentu byly brány jako referenční. K těmto referenčním hodnotám byly vztaženy hodnoty spočítané numerickou simulací (Hill 48 a Vegter). Hodnoty v závorkách pak ukazují procentuální rozdíl. V první tabulce (tab. 3.6) jsou uvedeny maximální hodnoty tažné síly. Ve druhé tabulce (tab. 3.7) jsou zapsány hodnoty, které představují rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším okrajem kelímku a ukazují tak cípatost na výtažku. Ve třetí tabulce (tab. 3.8) jsou zapsány hodnoty, které udávají maximální velikost hlavní deformace na vytažených kelímcích.

Tab. 3.6 - Maximální hodnota tažné síly

Maximální hodnota tažné síly [N]			
	Reálný experiment	Model HILL 48	Model VEGTER
Vzorek 119,6	24229	24518 (+ 1,19 %)	24433 (+ 0,84 %)
Vzorek 139,2	36269	38932 (+ 7,34 %)	39811 (+ 9,77 %)
Vzorek 164,8	51802	55240 (+ 6,64 %)	57102 (+ 10,23 %)

Tab. 3.7 - Cípatost

Cípatost [mm]			
	Reálný experiment	Model HILL 48	Model VEGTER
Vzorek 119,6	1,12	0,84 (- 25,00 %)	0,79 (- 29,46 %)
Vzorek 139,2	1,88	1,55 (- 17,55 %)	1,26 (- 32,98 %)
Vzorek 164,8	4,74	3,61 (- 23,84 %)	2,1 (- 55,70 %)

**Tab. 3.8 - Maximální hodnota hlavní deformace**

Maximální hodnota hlavní deformace [-]			
	Reálný experiment	Model HILL 48	Model VEGTER
<b>Vzorek 119,6</b>	0,2534	0,1928 (- 23,91 %)	0,2102 (- 17,05 %)
<b>Vzorek 139,2</b>	0,3733	0,3030 (- 18,83 %)	0,2910 (- 22,05 %)
<b>Vzorek 164,8</b>	0,5379	0,4602 (- 14,45 %)	0,4479 (- 16,73 %)

Výsledky numerické simulace, které jsou uvedeny v předchozích tabulkách, byly numericky spočítány u obou modelů s koeficientem tření 0,0225. U modelu dle Hilla 48 bylo použito hrubé síťování nástrojů a plechu. U modelu podle Vegtera bylo počítáno s jemnou sítí.

Při těchto podmínkách se reálným hodnotám spíše blížil model podle Hilla 48, než model dle Vegtera.

V následující tabulce (tab. 3.9) jsou ukázány výsledky jen na největším vzorku (164,8). Hodnota koeficientu tření byla nyní zvolena 0,04. U obou výpočtových modelů byla použita jemná síť nástrojů a plechu. V tabulce jsou opět uvedeny: maximální hodnota tažné síly, rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším okrajem výtažku a maximální hodnota hlavní deformace.

**Tab. 3.9 - Porovnání na vzorku 164,8 s jinými podmínkami simulace**

	Reálný experiment	Model HILL 48	Model VEGTER
<b>Tažná síla [N]</b>	51802	59919 (+ 15,67 %)	58280 (+ 12,51 %)
<b>Cípatost [mm]</b>	4,74	2,66 (- 43,88 %)	1,92 (- 59,49 %)
<b>Hl. deformace [-]</b>	0,5379	0,4328 (- 19,54 %)	0,4477 (- 16,77 %)

Při těchto podmínkách se zase reálnému experimentu blížil více model dle Vegtera, než model dle Hilla 48.

## 5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace a vzájemně porovnat dva výpočtové modely (starší model dle Hilla 48 a novější model dle Vegtera) mezi sebou a srovnat je s reálným experimentem. Pro experiment byl vybrán proces tažení a analýza deformace byla provedena na výlisku rotačního tvaru. Výlisky byly zhotoveny pro 3 různé výšky (hloubky tažení). Výtažky se lišily původními průměry kruhových vzorků plechu, ze kterých byly poté vytaženy potřebné kelímky. Byly použity následující průměry kruhových vzorků plechu:  $\varnothing 119,6$  mm;  $\varnothing 139,2$  mm a  $\varnothing 164,8$  mm. Jako zkušební materiál, na kterém byl uskutečněn experiment, byla použita hliníková slitina AlMg3, jež byla pořízena z firmy Alcom Alval s.r.o. Deformační analýza kelímků byla realizována dvěma způsoby, nejdříve pomocí bezkontaktního optického měřicího systému Argus od německé firmy GOM a poté pomocí numerické simulace v programu PAM-STAMP 2G od společnosti ESI.

Experimentální měření a vyhodnocování zkoušek (statická zkouška tahem, hydraulická zkouška vyboulováním a kalíšková zkouška) bylo provedeno v prostorách lisovny kovů a laboratoře zkoušení kovů na Katedře strojírenské technologie Fakulty strojní TU v Liberci. Snímání kelímků pomocí systému Argus bylo vykonáno v prostorách lisovny ve firmě Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi. Pomoc s numerickou simulací s výpočtovým modelem podle Vegtera byla poskytnuta společností MECAS ESI s.r.o. v Plzni.

Výsledky získané z reálného procesu tažení a výsledky z numericky simulovaného procesu tažení byly vzájemně porovnávány a hodnoceny podle třech kritérií - 1) podle průběhu tažných sil, 2) podle cípatosti a 3) podle průběhu hlavní deformace. U reálného experimentu byla tažná síla zaznamenávána na klikovém lisu počítačem, cípatost byla měřena ručně pomocí digitálního úchylkoměru a pro zjištění průběhu hlavní deformace byla provedena analýza deformace měřícím systémem Argus. U numerické simulace byla všechna tři kritéria spočítána a získána pomocí programu PAM-STAMP 2G. U numerického výpočtu byla uplatněna aplikace modelu dle Hilla 48 a dle Vegtera. Výpočet dle Hilla 48 byl prováděn jak s hrubou sítí (5 mm), tak i s jemnou sítí (1 mm) nástrojů a plechu. U modelu Vegter bylo zvoleno pouze jemné síťování. V experimentální části práce v kapitolách 3.4 a 3.5, kde je ukázáno vyhodnocení experimentu a numerické simulace, jsou hodnotící kritéria (tažná síla, cípatost a hlavní deformace) brána pro všechny tři velikosti kelímků (119,6; 139,2 a 164,8). V kapitole 4, kde jsou vyhodnoceny výsledky, je již hodnocení uvedeno pouze pro největší kelímek (164,8), protože hodnoty získané na tomto největším kelímku mají pro nás důležitější význam, než výsledky na menších kelímcích.



Při vyhodnocování výsledků bylo zjištěno, že při použití hrubého síťování nástrojů a plechu má velikost koeficientu tření velký vliv na správné provedení numerického výpočtu, protože již při tření 0,03 neproběhla simulace procesu tažení korektně (kelímek se utrhl). Naopak při výpočtu s jemnou sítí bylo možné nastavovat daleko větší hodnoty koeficientu tření. V tomto případě došlo k porušení kelímku až při tření 0,07. Proto při aplikaci jemného síťování nemá tření tak výrazný vliv na numerický výpočet. V další fázi vyhodnocování byly srovnávány výpočtové modely Hill 48 a Vegter. Podle teoretických podkladů [31] je výpočtový model Vegter oproti ostatním standardním modelům přesnější. Tento fakt byl při vyhodnocování výsledků také potvrzen, jelikož výsledky modelu Vegter vůči modelu Hill 48 se více blížily reálným hodnotám, jež byly získány z reálného tažení. Ovšem rozdíl v přesnosti mezi oběma modely není nijak markantní, navíc tvorba modelu dle Vegtera je složitější, proto tam, kde stačí provádět hrubé analýzy lisovacích procesů, spolehlivě postačí uplatnění modelu dle Hilla 48. Pro přesnější analýzy je lepší vykonat numerickou simulaci modelem dle Vegtera.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] <http://www.tipcars.com> (červen 2011)
- [2] <http://auto.idnes.cz> (duben 2011)
- [3] NAJVAR, P.: Snižování hmotnosti osobních automobilů na základě volby materiálů. Bakalářská práce. Brno: VUT v Brně, 2009
- [4] SLAVÍČEK, J.: Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu. Bakalářská práce. Brno: VUT v Brně, 2011
- [5] <http://www.novinky.cz/auto> (září 2003)
- [6] <http://www.autorevue.cz> (prosinec 2004)
- [7] <http://www.worldcarfans.com> (duben 2005)
- [8] <http://www.autofieldguide.com> (květen 2011)
- [9] LOSERTOVÁ, M.: Hliník a jeho slitiny. Učební text z předmětu Úvod do nauky o materiálu. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2008
- [10] ALAXIN, J.: Nauka o materiálu. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1989
- [11] PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu. Díl 2. 1. vyd. Brno: CERM, 1999
- [12] MICHNA, Š., aj.: Aluminium materials and technologies from A to Z. Děčín: s.n., 2007
- [13] LEINVEBER, J.; VÁVRA, P.: Strojnické tabulky. Úvaly: Albra - pedagogické nakladatelství, 2003
- [14] <http://www.hlinik.cz> (březen 2012)
- [15] PETRUŽELKA, J.; SONNEK, P.: Tvařitelnost kovových materiálů. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2009
- [16] TMĚJ, J.; MIKEŠ, V.: Teorie tváření. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990

- [17] SOLFRONK, P.: Přednášky z předmětu Teorie tváření. Liberec: Katedra strojírenské technologie - Fakulta strojní, TU v Liberci, 2010
- [18] SOLFRONK, P.: Přednášky z předmětu Experimentální metody v tváření. Liberec: Katedra strojírenské technologie - Fakulta strojní, TU v Liberci, 2011
- [19] SIEGRT, K.; WAGNER, S.: Formability Characteristics of Aluminium Sheet. Stuttgart: Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 1994
- [20] DONIČ, T.: Analytické a experimentálne metódy predikcie ukazovateľov lisovateľnosti tenkých plechov. Žilina: Katedra aplikovanej mechaniky - Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, 2008
- [21] PLÁNIČKA, F.; KULIŠ, Z.: Základy teorie plasticity. 2. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2009
- [22] HÖSCHL, C.: Pružnost a pevnost. 1. sv. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992
- [23] HÖSCHL, C.: Pružnost a pevnost. 2. sv. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992
- [24] BÖHM, J.: Fotogrammetrie. Učební text. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2002
- [25] SKOUPÝ, P.: 3D optické a skenovací systémy pro strojírenství. Bakalářská práce. Brno: VUT v Brně, 2007
- [26] VOLEK, A.: Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos. Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, 2008
- [27] <http://www.gom.com> (březen 2012)
- [28] <http://www.mcae.cz> (březen 2012)
- [29] <http://www.esi-group.com> (duben 2012)
- [30] <http://www.mmspektrum.com> (červenec 2001)
- [31] VEGTER, H.; HORN, C.: The Vegter Material Model. Tata Steel. 2011

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 - Výstupní protokoly ze statické zkoušky tahem

Příloha č. 2 - Smluvní a skutečné diagramy ze směrů  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  a  $90^\circ$

## **PŘÍLOHA č. 1**

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

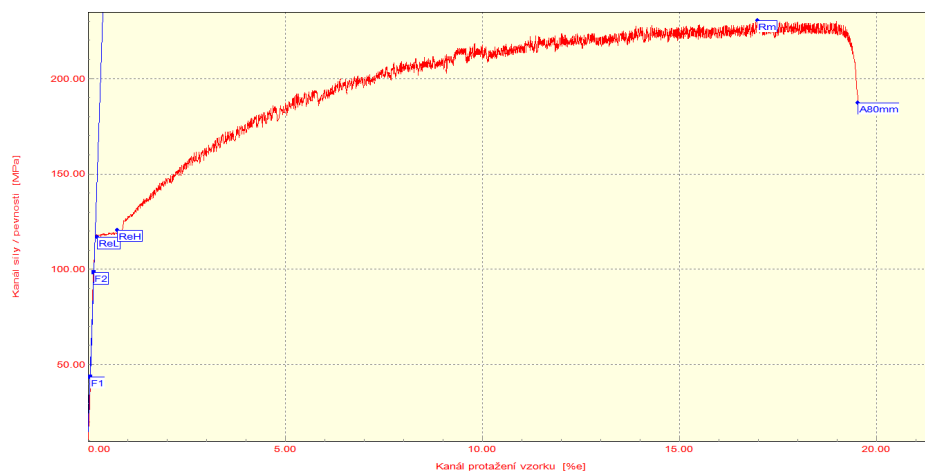
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vyracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 0°

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	Ag %
1	116.6	120.6	230.3	19.26	16.64

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	Ag %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	117.0	120.1	230.8	18.78	17.30
Směrodatná odchylka	0.5	0.6	0.5	0.43	1.16



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

SMĚR 15°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

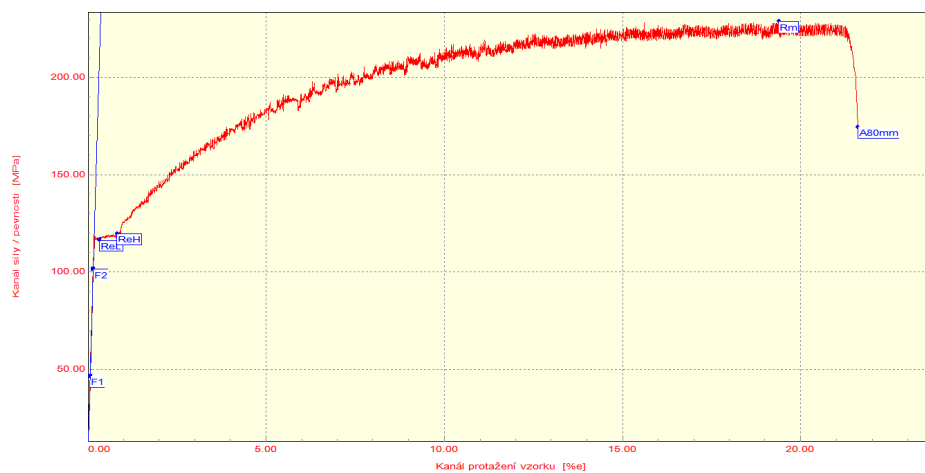
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 15°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	116.4	119.7	229.0	21.35	19.04

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	116.2	119.8	228.6	20.88	18.88
Směrodatná odchylka	0.3	0.2	0.7	0.66	0.23



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

SMĚR 30°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

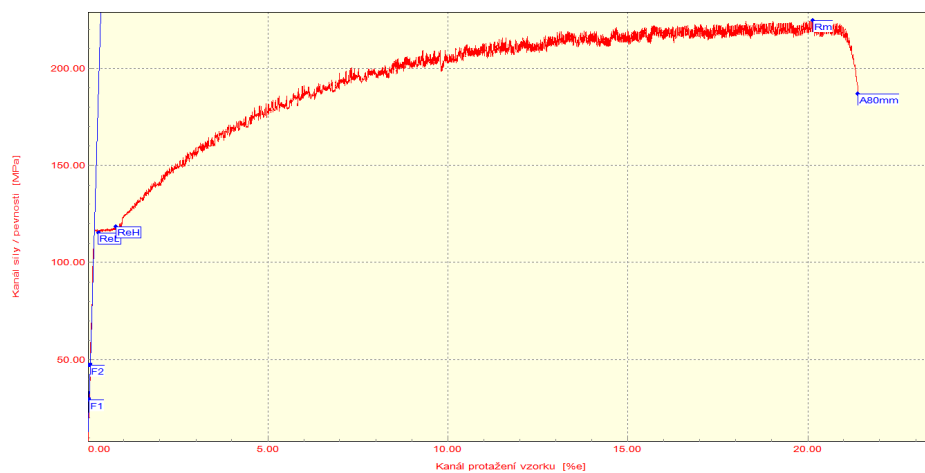
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 30°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	115.3	118.6	224.4	21.13	19.82

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	115.2	118.3	224.9	22.54	19.89
Směrodatná odchylka	0.2	0.5	0.8	2.00	0.11



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



SMĚR 45°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

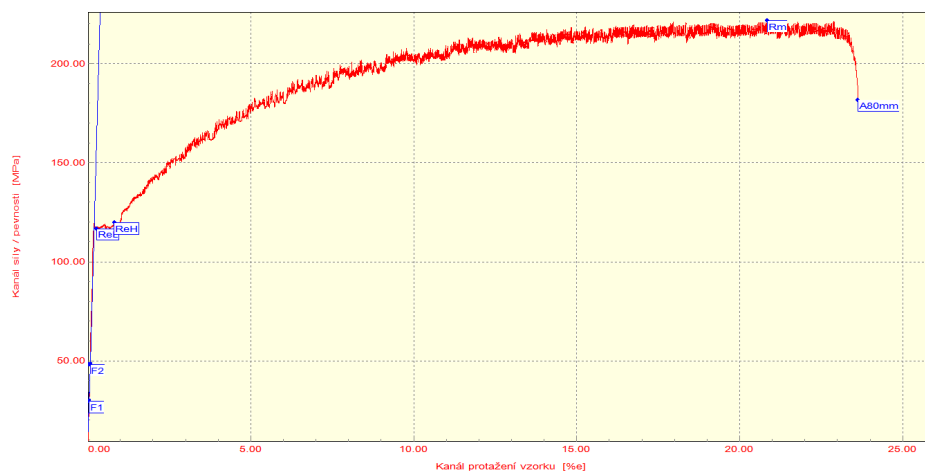
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 45°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	116.4	119.7	221.6	23.37	20.52

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	116.3	119.4	222.0	23.87	21.89
Směrodatná odchylka	0.0	0.3	0.6	0.71	1.94



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

SMĚR 60°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

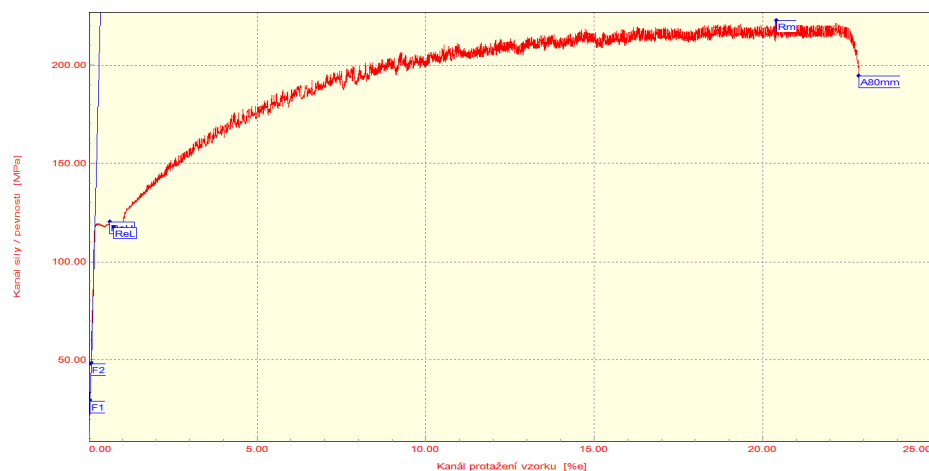
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 60°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	117.4	120.1	222.5	22.58	20.10

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	117.0	120.3	222.0	24.25	21.26
Směrodatná odchylka	0.6	0.2	0.7	2.36	1.65



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

SMĚR 75°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

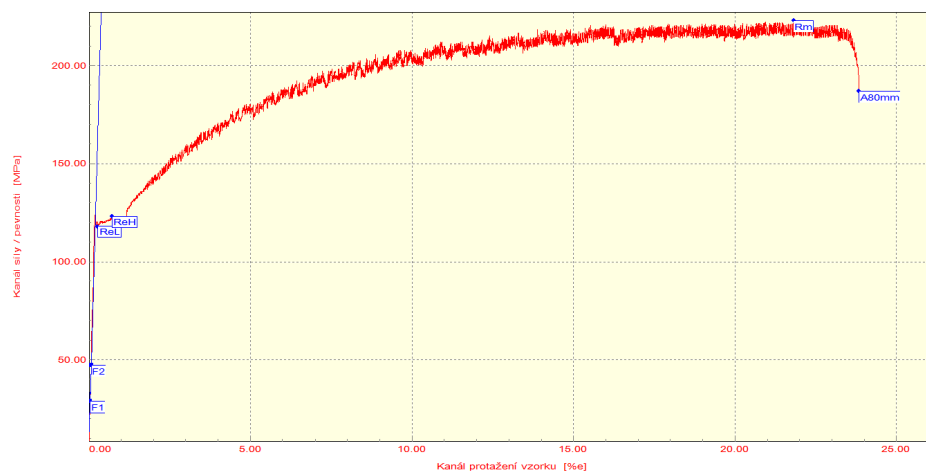
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 75°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	118.0	123.3	222.8	23.56	21.49

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	117.9	123.1	222.7	23.78	20.65
Směrodatná odchylka	0.1	0.3	0.2	0.31	1.18



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

SMĚR 90°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

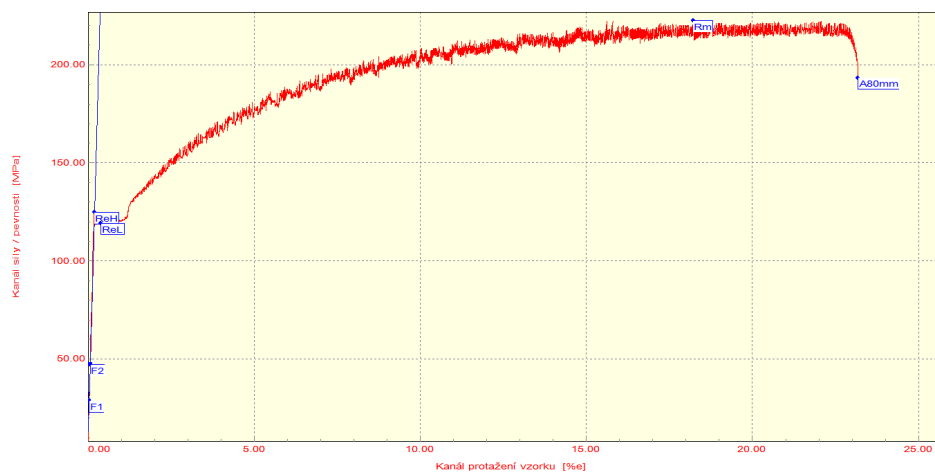
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AlMg3  
Norma: : EN AW 5754  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.  
Rozměr vzorku: : 20 x 1 [mm]  
Vypracoval: : Jiří Žďárský  
Datum zkoušky: : 9.2. 2012  
Směr odebrání vzorku : 90°

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
1	119.0	124.7	222.4	22.88	17.88

Statistická hodnota	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	A80mm %	A <sub>g</sub> %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	118.9	123.7	222.2	22.48	19.14
Směrodatná odchylka	0.1	1.5	0.3	0.57	1.78



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

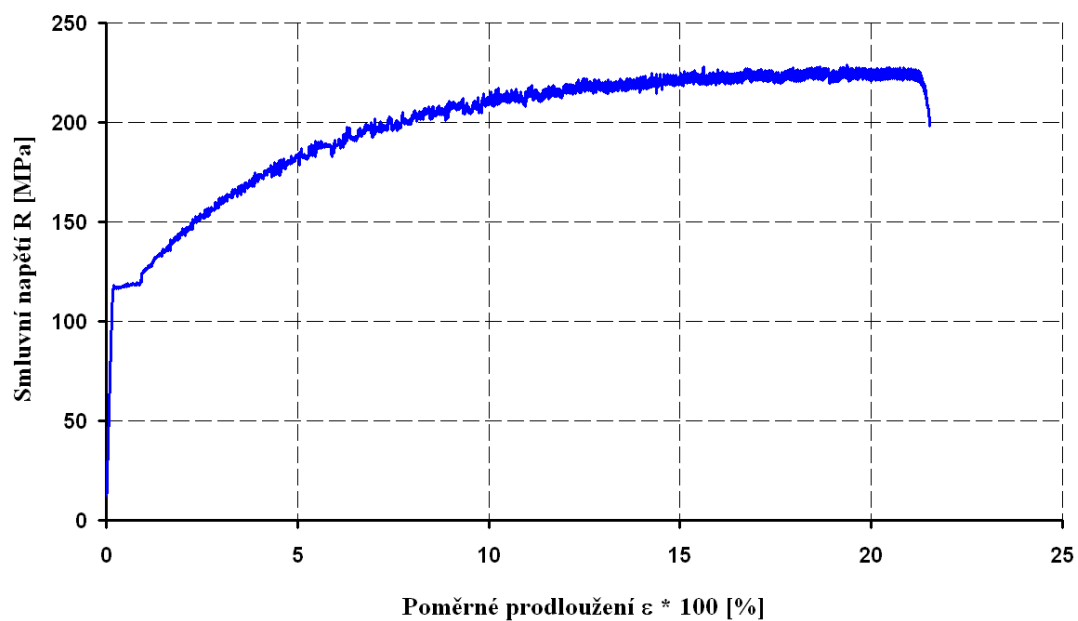
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

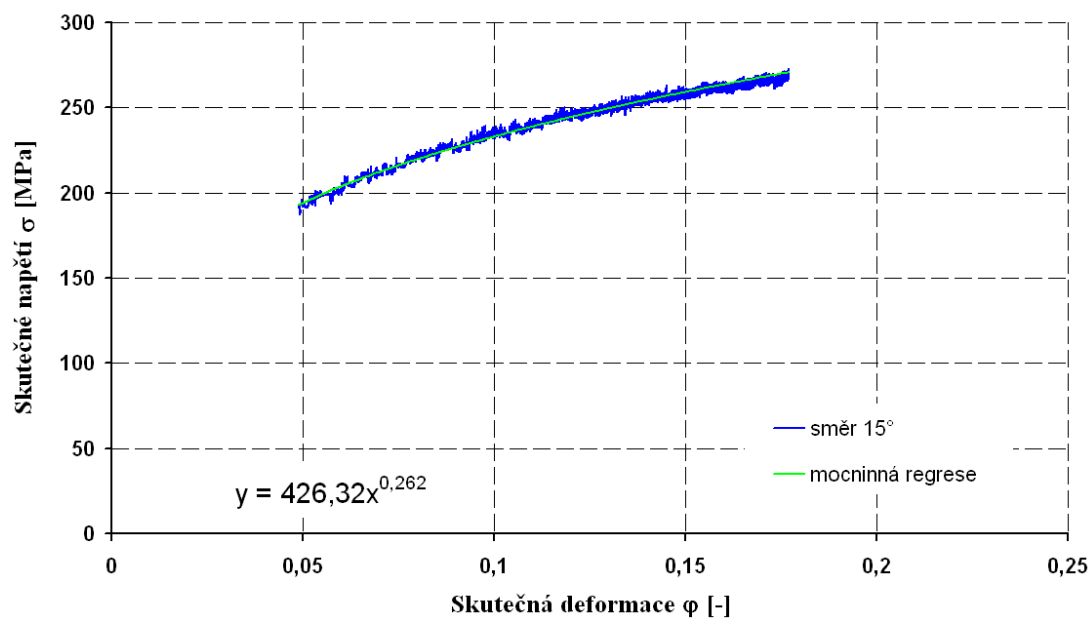
## **PŘÍLOHA č. 2**

SMĚR 15°

**Smluvní diagram (směr 15°)**

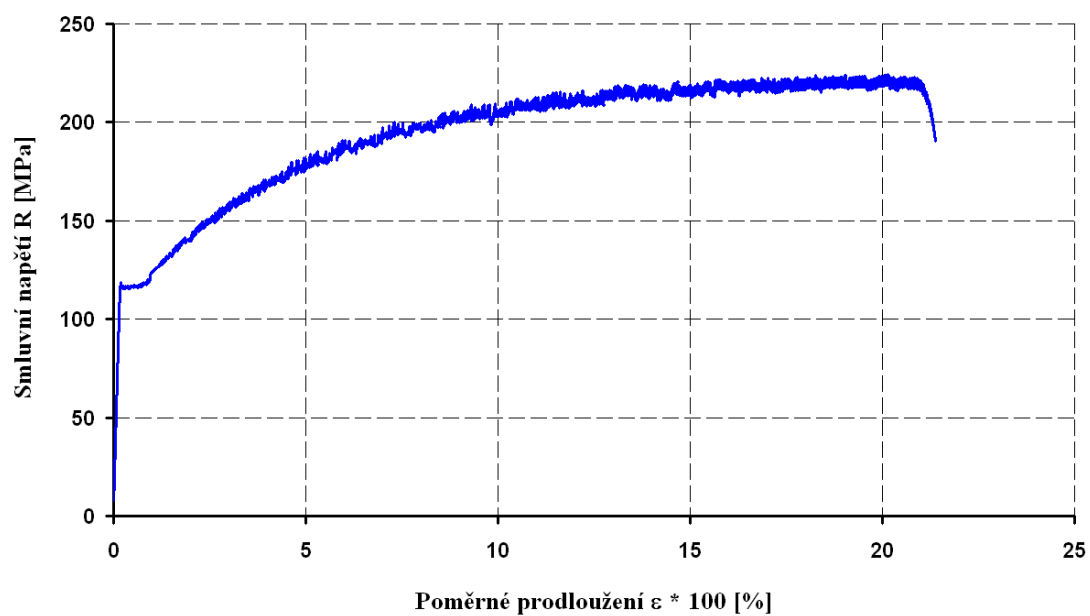


**Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 15°)**

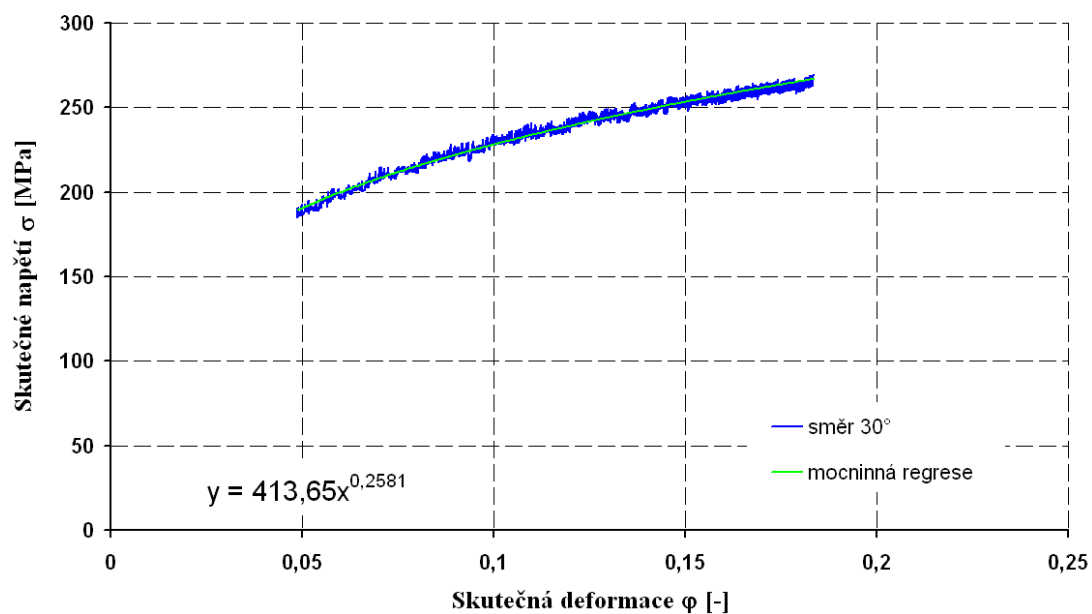


SMĚR 30°

**Smluvní diagram (směr 30°)**

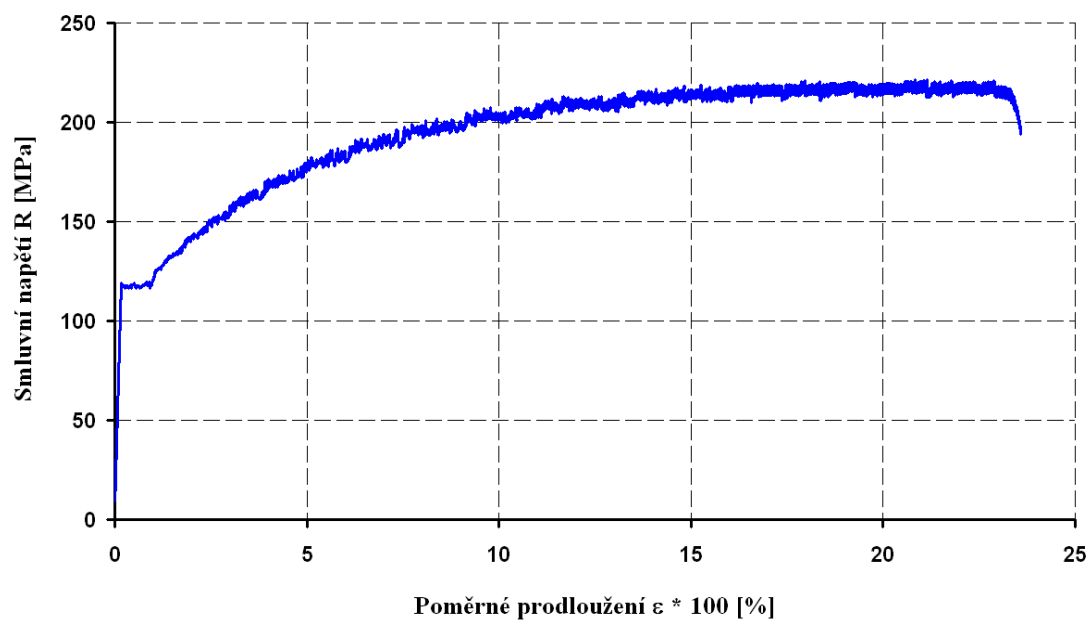


**Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 30°)**

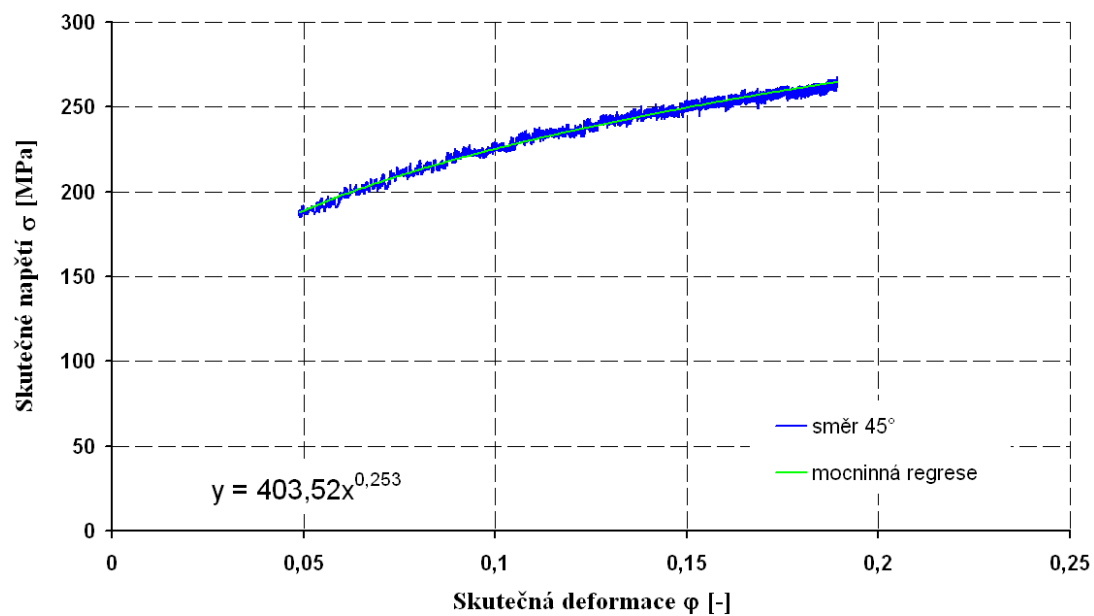


SMĚR 45°

**Smluvní diagram (směr 45°)**



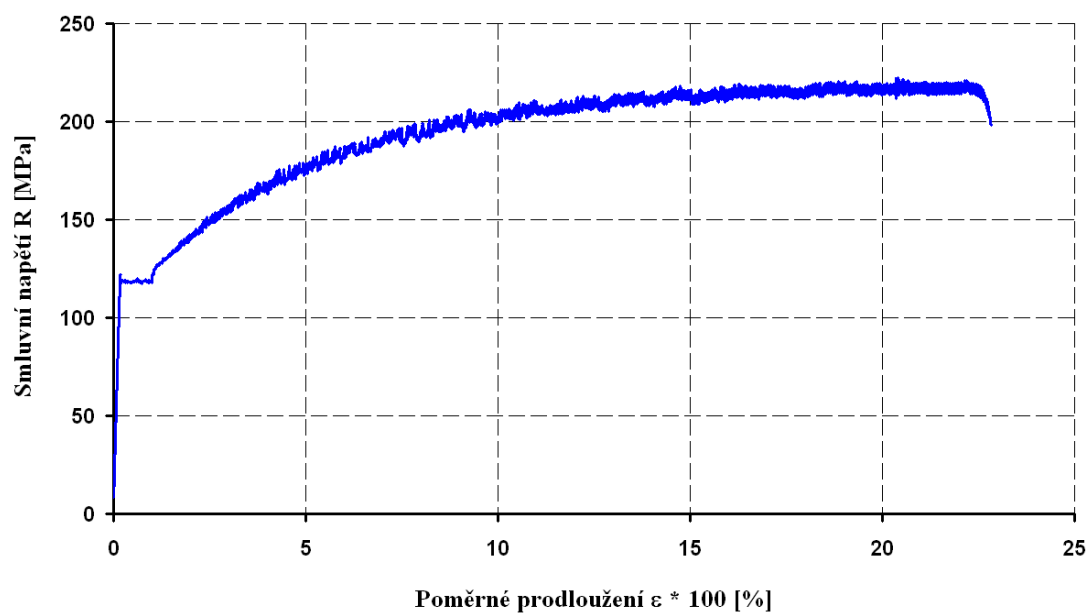
**Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 45°)**



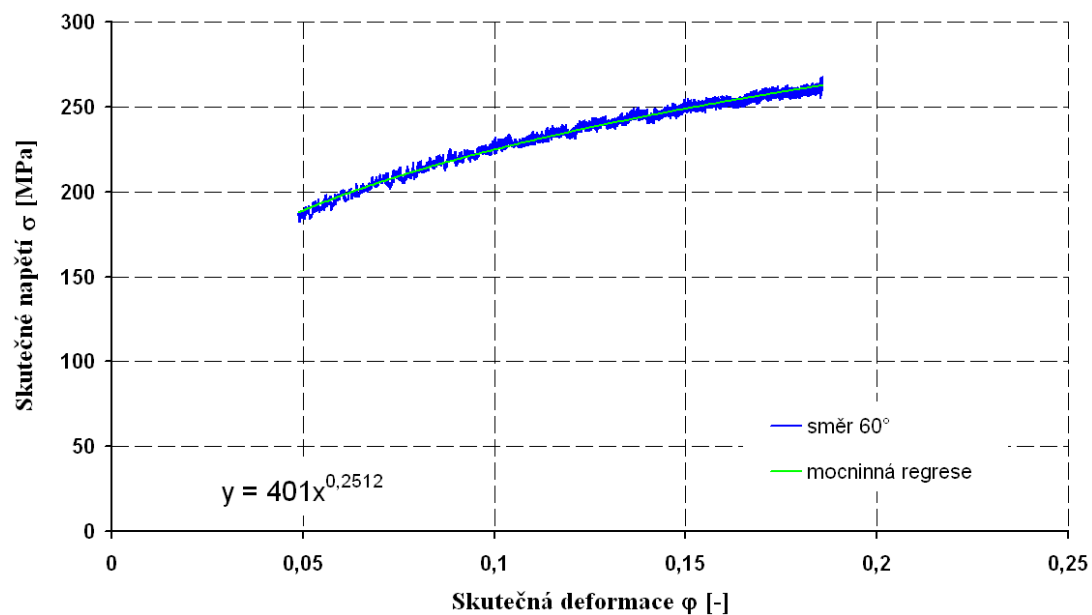


SMĚR 60°

**Smluvní diagram (směr 60°)**

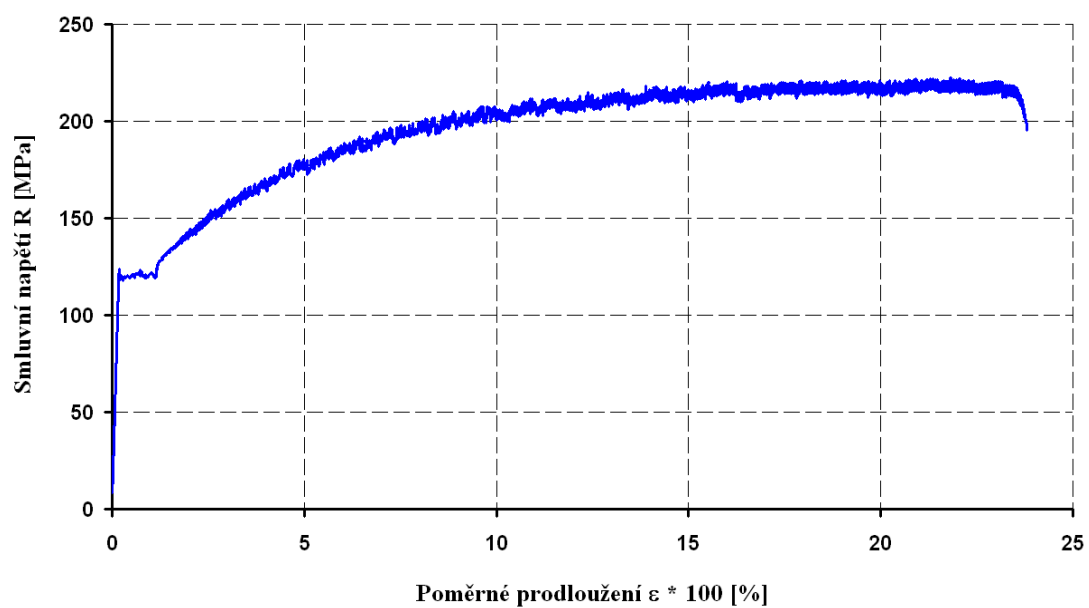


**Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 60°)**

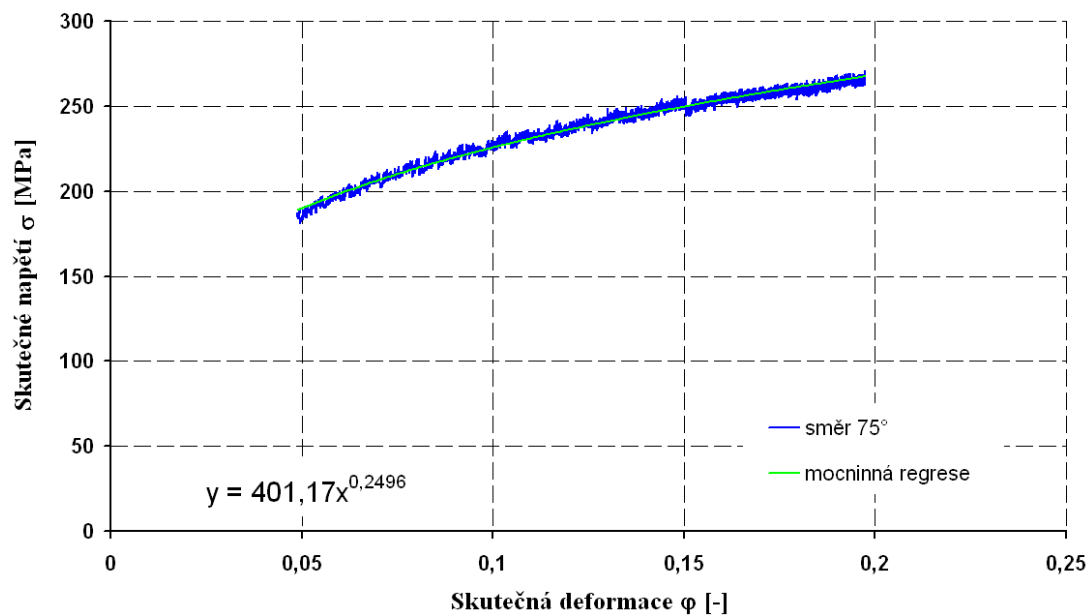


SMĚR 75°

Smluvní diagram (směr 75°)

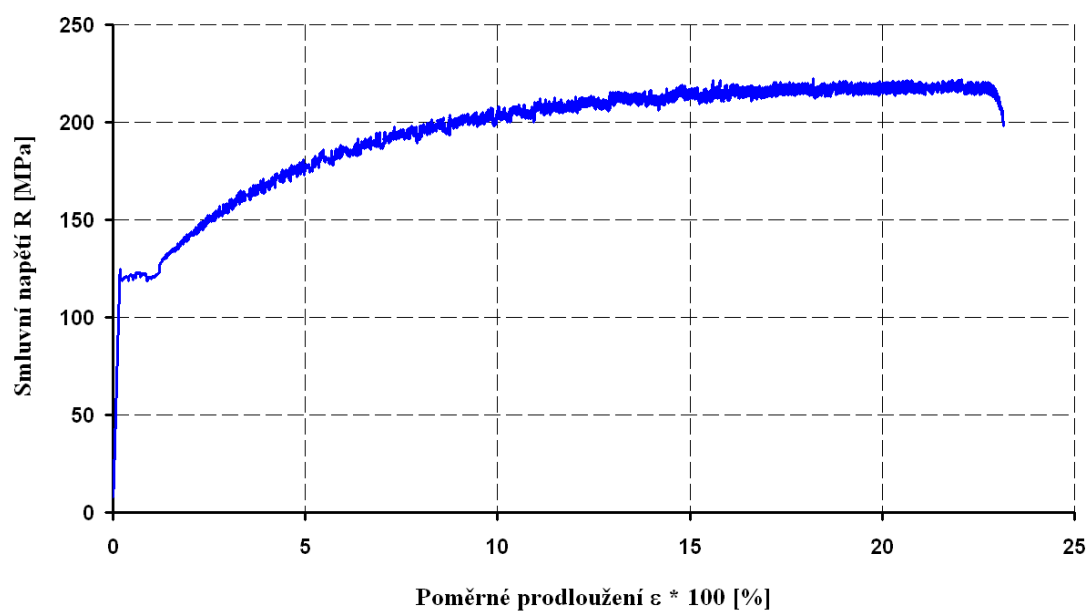


Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 75°)

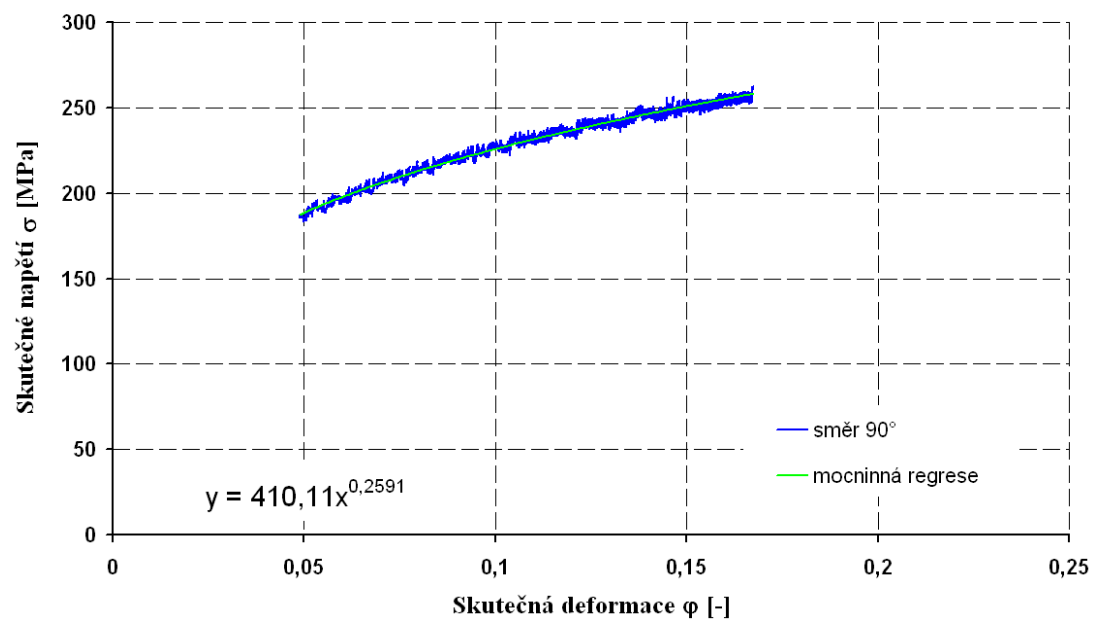


SMĚR 90°

**Smluvní diagram (směr 90°)**



**Skutečný diagram a jeho aproximace (směr 90°)**



## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25. května 2012

Podpis:

### **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25. May 2012

Signature: